The background of the page features a large, faint, circular seal of the University of Naples Federico II. The seal depicts a seated monarch, likely Frederick II, wearing a crown and holding a scepter. The Latin inscription around the border reads "SIGILLUM UNIVERSITATIS FEDERICI SECUNDI REGIS" and "ANNO DOMINI MCCLXXXIII".

Scuola Politecnica e delle Scienze di Base
Università degli Studi di Napoli "Federico II"
Scuola di Dottorato in Architettura

Dottorato di Ricerca in Tecnologia dell'Architettura

XXVIII ciclo

Dottoranda: Nicolina Mastrangelo

Tutor: prof. Dora Francese
anno accademico 2015/2016

STRAWind Ventilated roof
Sviluppo e sperimentazione di un sistema/componete
per coperture ventilate ecosostenibili
prodotte dalla conversione dei "by products" della paglia

Il Coordinatore
prof. arch. Mario Losasso

INDICE

Premessa	6
1. INNOVAZIONE DEL PRODOTTO E MATERIALI EDILI SOSTENIBILI	
1.1. Il tema ambientale e i prodotti edilizi: questioni risolte	10
1.1.1 L'innovazione e la sostenibilità dei prodotti edili	10
1.1.2 Le strategie di produzione eco-orientate: Ecologia industriale	20
1.1.3 L'ecologia industriale e il metabolismo biologico dei prodotti	23
1.2. Azioni politiche e normative	24
1.2.1 La Politica Integrata di Prodotto -Integrated Product Policy -	24
1.2.2 Gli acquisti verdi - Green Public Procurement –	26
1.2.3 Politiche ambientali di processo: Environmental Management Systems	26
1.2.4 Politiche ambientali di prodotto: Sistemi di Gestione Ambientale Product-Oriented Environmental Management Systems	28
1.2.5 La marcatura CE dei prodotti da costruzione	29
1.3 L'edilizia sostenibile e l'eco-sostenibili e bio-compatibilità delle costruzioni	30
1.3.1 Il quadro normativo sull'eco-sostenibile e bio-compatibilità delle costruzioni	33
1.3.2 Strumenti di valutazione della sostenibilità del prodotto	38
1.3.2.1 Metodi basati sulla LCA	41
1.3.2.2 Metodi multicriteria	44
1.3.2.3 Metodi basati su indicatori sintetici	50
1.3.3 Prodotti coibentanti ecosostenibili	54
2. MATERIALI A BASSO IMPATTO AMBIENTALE: LA PAGLIA	
2.1 Morfologia, Produzione e usi	61
2.2 Materiale tradizionale da costruzione	64
2.2.1 L'evoluzione delle tecniche costruttive delle case in paglia	64
2.2.2 Prodotti e sistemi prefabbricati in paglia	67
2.2.3 Pannelli di finitura e di arredo	71
2.2.4 Le caratteristiche delle balle usate in edilizia: aspetti e proprietà	72
2.3 Le costruzioni in paglia in Italia	
2.3.1 Disponibilità delle materia prima a scala nazionale	76
2.3.2 I benefici ambientali dell'impiego della paglia nelle costruzioni	77
2.3.3 Esempi di case in paglia in Italia	79
2.4 Le coperture in paglia	
2.4.1 La tecnica costruttiva tradizionale dei tetti in paglia	82
2.4.2 La tecnica costruttiva contemporanea dei tetti in paglia	84
3. CAMPO DI APPLICAZIONE DELLA PROPOSTA DI RICERCA:COMPONENTI DI COPERTURA COIBENTANTI	
3.1 L'efficienza energetica degli involucri di chiusura	87
3.2 Superfici di copertura: potenziale coibentante e strategie di involucro	91
3.2.1 Chiusure superiori: requisiti e prestazioni	97
3.2.2 Coibentare le coperture a falda	102
3.2.3 Coibentare le coperture piane	105
3.2.4 Ventilazione : i vantaggi energetici	111
3.3 L'efficienza termica delle coperture	113
3.3.1 Normativa tecnica coibentanti	117
3.3.2 Dal pannello isolante in fibra vegetale al pacchetto modulare coibentante	123

4. CARATTERIZZAZIONE DELL'ELEMENTO ISOLANTE DEL SISTEMA

OGGETTO DI STUDIO: PANNELLO SANDWICH A BASE DI UN BIOCOMPOSITO ORGANICO

4.1 Premesse e caratterizzazione del pannello sandwich	125
4.1.1 Studio delle caratteristiche delle materie prime impiegate per produrre il pannello sandwich isolante	126
4.1.2 La componente matrice in PLA	129
4.1.3 La produzione di PLA :impatto ambientale	132
4.1.4 La paglia: problemi di interfaccia e soluzioni per migliorarne l'aderenza	134
4.2 Assemblaggio e messa in opera del sistema modulare coibentante ventilato	136
4.2.1 Progettazione del sistema/ pacchetto per coperture isolate e ventilate	138
4.2.2 Materiali e metodi usati per progettare il componente core del pannello coibentante studiato	140
4.2.3 La filiera produttiva dei pannelli eco_boards: componente <i>skin</i> del pannello coibentante studiato	143

5. VERIFICHE SUI COMPONENTI DEL PANNELLO SANDWICH

5.1 Prove di laboratorio sui componenti del pannello sandwich	146
5.1.1 Prove meccaniche: prova a flessione per tre punti sul componente <i>core</i>	147
5.1.2 Determinazione del fattore K del <i>core</i>	148
5.1.3 Prova di assorbimento dell'acqua del <i>core</i>	150
5.1.4 Caratteristiche del pannello <i>skin</i>	154
5.2 Simulazione mediante software del comportamento del sistema coibentante di copertura	157
5.2.1 Verifica della condensa interstiziale	159
5.2.2 Simulazione del comportamento termico di un edificio coibentato con il Pannello Straw_wind e alcuni prodotti competitor	163
5.2.3 Analisi comparativa della prestazione termica delle diverse soluzioni coibentanti usate nella simulazione	165

6. CONCLUSIONI E PROSPETTIVE FUTURE

165

BIBLIOGRAFIA

168

Premessa

Coniugare la sostenibilità ambientale delle produzioni con la competitività sui mercati dei prodotti Green è una sfida che interessa tutti i settori produttivi; tuttavia l'elevata incidenza del comparto edilizio (gli impatti ambientali del settore delle costruzioni rappresenta circa il 40% rispetto a tutti i settori produttivi) richiede una maggior presa di coscienza di quelle che possono essere le scelte “eticamente” corrette che un progettista deve porsi. Le ragioni che hanno stimolato l'interesse della ricerca verso le potenzialità offerte dalla fibra di paglia nascono dall'esigenza di concretizzare le informazioni raccolte in occasione di un seminario promosso dall'associazione INBAR di Napoli nel comune irpino di Flumeri. In questo territorio, la vocazione agricola e soprattutto la coltivazione del grano crea un'ampia disponibilità di paglia da poter sfruttare anche per fini edilizi. In linea con le indicazioni della progettazione in paglia, l'amministrazione si è fatta promotrice di un prototipo di casa in paglia prefabbricata (Fig. 1).

A questo primo input sono seguiti degli studi sulla caratterizzazione delle costruzioni in paglia; la letteratura scientifica dimostra grande interesse verso la tecnologia costruttiva in paglia, ad esempio i documenti prodotti dall'università di Bath (Regno Unito) sono stati un valido supporto per indagare l'orientamento tecnologico dato all'impiego della paglia in edilizia; con il progetto di ricerca Eurocell e con la collaborazione con l'azienda Modcell sono state studiate inoltre le caratteristiche dei pannelli modulari in paglia. L'innovazione di prodotto, introdotta con la prefabbricazione dei pannelli modulari delinea uno scenario edilizio “low-cost” sia per il materiale impiegato che per la messa in opera del sistema tecnologico diffuso con l'impiego dei pannelli Modcell.



Figura 1. Casa in paglia prefabbricata Flumeri Avellino

STRAW_WIND Ventilated roof
Sviluppo e sperimentazione di un sistema/componente
per coperture ventilate ecosostenibili
prodotte dalla conversione “by products” della paglia

L'ambito scientifico in cui si può collocare la ricerca dottorale è duplice; infatti, la tematica trattata propone sia uno studio sull'innovazione di processo (assenza di formaldeide e processi produttivi meno energivori per la produzione di alcuni componenti usati nel sistema) sia una innovazione di prodotto mediante la progettazione di un sistema modulare coibentante in materiale organico. Lo studio si contestualizza nella potenziale gestione delle risorse locali, agendo sugli scenari produttivi di sistemi e tecnologie "eco" è possibile considerare delle filiere di prodotto sostenibili che consentono di perseguire la qualità del sistema edilizio. Il beneficio indotto dall'applicazione di copertura oggetto di studio potrebbe contribuire sia a migliorare la qualità edilizia (prodotto sostenibile) che il sistema edificio (risparmio energetico); la caratterizzazione di componenti/sistemi eco-orientati rientra a pieno titolo nelle scelte strategiche nei processi di innovazione che conducono alla scenario Green Economy. Generare processi produttivi a basso contenuto di carbonio, efficientare l'uso delle risorse, ma soprattutto "chiudere il ciclo" dei prodotti e sistemi messi in opera in ambito edilizio stimola l'innovazione e soprattutto consente di trasformare l'agire insostenibile delle attività umane in azioni sostenibili. Lo scopo della ricerca è quindi quello di definire attraverso un sistema coibentante per copertura, un prodotto che possa agire sul:

- contenimento energetico delle chiusure superiori;
- fine vita biologico del prodotto;
- processo produttivo a ridotto impatto ambientale;
- prodotto ecosostenibile e biocompatibile;
- l'uso della paglia in edilizia.

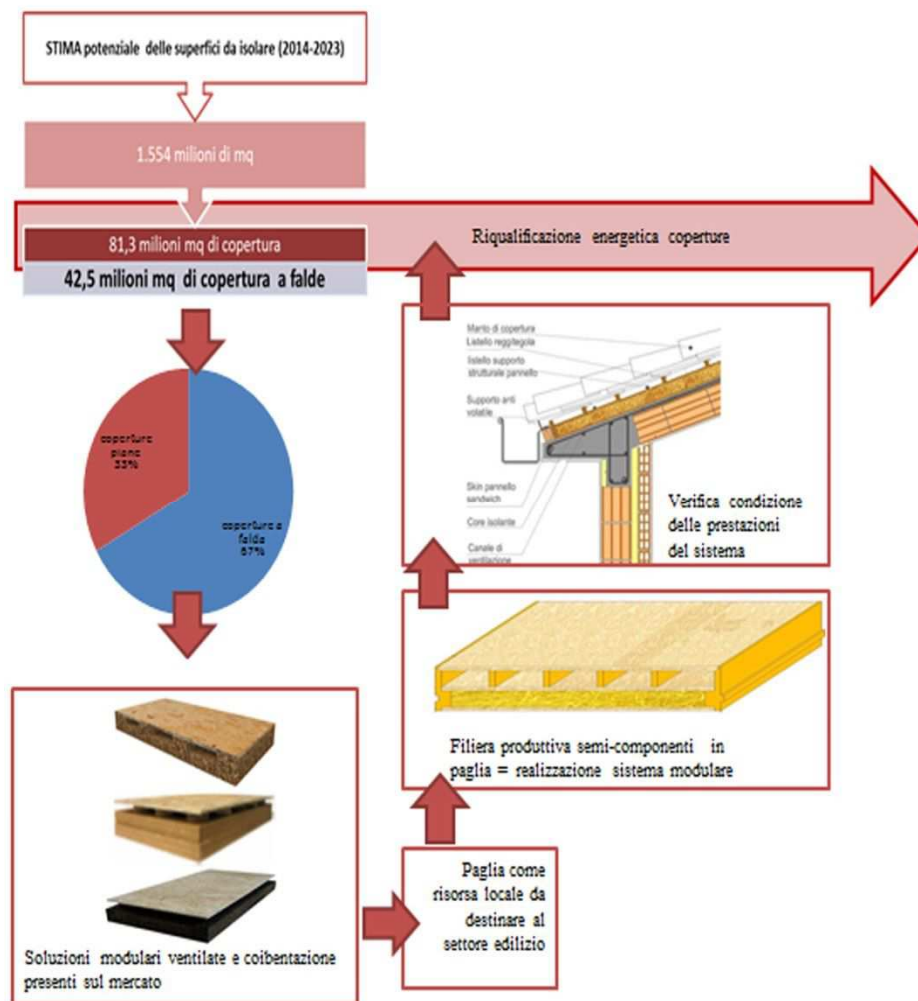


Figura 2 Schematizzazione degli obiettivi della ricerca

Per poter soddisfare questi obiettivi le azioni della ricerca sono state:

- Disponibilità delle superfici utili da coibentare;
- Requisiti dei prodotti isolanti;
- Analisi di mercato sui prodotti isolanti vegetali;
- Analisi di mercato sui sistemi modulari;
- Definizione sistema coibentante da studiare;

STRAW_WIND *Ventilated roof*

Sviluppo e sperimentazione di un sistema/componete
per coperture ventilate ecosostenibili
prodotte dalla conversione "by products" della paglia

- Verifica caratteristiche elementi del sistema;
- Vantaggi d'uso del sistema di copertura.

Nello specifico le fasi della ricerca sono state tre:

L'analitico-conoscitiva è la prima fase di studio ed è stata caratterizzata dalla definizione delle conoscenze di base sulle strategie di gestione degli impatti ambientali delle costruzioni; è stato approfondito il tema degli strumenti di valutazione con cui viene stimata la sostenibilità dei prodotti e si è approfondita la questione sulla tecnologia costruttiva tradizionale in paglia nonché sulla innovazione di prodotto; infatti tale tecnologia facilita e trasforma le procedure di assemblaggio dei componenti edilizi.

La fase Sperimentale, si è contraddistinta come attività di laboratorio; sono stati prodotti in collaborazione con il CNR di Pozzuoli i campioni di paglia e pla che sono stati unitizzati in un secondo momento per le prove termo-meccaniche di laboratorio del componente coibentante “core” del prodotto sandwich che compone il sistema coibentante modulare ventilato oggetto di studio. Sono state inoltre fatte delle simulazioni del comportamento energetico di una copertura coibentata con il sistema e mediante una valutazione comparativa si è prodotto un confronto con le prestazioni di due prodotti competitor.

In fine sono stati considerati i punti di forza e di debolezza della ricerca e i possibili scenari futuri del progetto di ricerca.

1. INNOVAZIONE DEL PRODOTTO SOSTENIBILE E MATERIALI EDILI NATURALI

1.1 Il tema ambientale e i prodotti edilizi: questioni risolte

Prima di definire l'evoluzione del concetto di sostenibilità e i diversi strumenti di valutazione posti a supporto della "progettazione sostenibile" è bene fare una piccola riflessione sull'evoluzione del rapporto tra ambiente e prodotto edilizio. Il concetto di prodotto edilizio in questa sede è stato affrontato nella duplice concezione di elemento tecnico¹ e sistema edilizio²; considerando tali scale di lettura consente di comprendere come lo sviluppo degli indicatori a punteggio e delle metodologie di analisi (LCA) siano indispensabili per superare la problematica ambientale del settore edilizio. Secondo Campioli³, la questione ambientale delle costruzioni deve essere gestita affrontando tre nodi problematici:

- la sostenibilità ambientale rispetto alla scelte di progetto (con particolare riferimento alla scala degli edifici);
- la definizione dei problemi legati al contenimento energetico e agli impatti ambientali che si verificano in fase di uso e gestione dell'edificio;
- l'individuazione della prospettiva dell'intero ciclo di vita di un manufatto architettonico edilizio come contesto nel quale si possono valutare correttamente le differenti opzioni tecniche e materiche da applicare nella fase costruttiva.

Dal Punto di vista normativo, la riduzione del fabbisogno energetico delle costruzioni e quindi il relativo impatto ambientale del sistema

1. Secondo la norma UNI 8290 è un elemento che si identifica con un prodotto edilizio, più o meno complesso, capace di svolgere, completamente o parzialmente, funzioni proprie di una o più unità tecnologiche.

2. La Norma UNI 8290 definisce il sistema edilizio come sovrastruttura dei sistemi ambientale e tecnologico che si esplica attraverso un insieme strutturato di unità ambientali/elementi spaziali e di unità tecnologiche/elementi tecnici corrispondenti.

3. Cfr. Marisa Bertoldini, Andrea Campioli, "Cultura tecnologica e ambiente", Città Studi Edizioni, Novara, 2009

edilizio è attuabile operando delle scelte tecnologiche e materiche che siano conformi alla Direttiva Europea 2002/91/CE⁴, il pacchetto energia con le direttive EPBD-Energy performance building directive prevede l'obbligo del raggiungimento di standard energetici declinando il concetto di “edifici a energia quasi zero” - NZEB- Nearly Zero-Energy Building, ovvero, edifici ad altissima prestazione energetica, il cui fabbisogno, molto basso o quasi nullo, dovrebbe essere coperto in misura significativa dalle fonte energetiche rinnovabili. La Direttiva delinea quindi i passi che ogni Stato membro dovrà compiere per definire un NZEB sia da un punto di vista tecnico che finanziario; gli Stati Membri dell'UE definiscono i propri requisiti minimi di prestazione energetica degli edifici in un'ottica di raggiungimento del “livello ottimale di costo” durante il ciclo di vita economico stimato dell'edificio, ovvero le soluzioni di efficienza energetica “ottimali” sono quelle che consentono di raggiungere la migliore prestazione energetica considerando l'equilibrio tra investimento e ammortamento, considerando la stimando di tutte le componenti di costo che entrano in gioco durante l'intero ciclo di vita di un edificio. Se in passato la diffusione di una progettazione “attenta all'ambiente” era solo una prerogativa dell'architettura Bioclimatica oggi rappresenta l'unico modo per affrontare e superare i limiti di un settore così altamente energivoro come quello edilizio, considerando la direzione indicata dalla Direttiva Europea si può quindi affermare che i mezzi con cui si persegue la sostenibilità sono in grado di soddisfare i risultati attesi. L'edificio contemporaneo è progettato secondo la logica del sistema aperto, cioè è posto in stretta connessione con il proprio intorno, l'interrelazione interno/esterno e costruzione/ambiente non è solo percettiva (benessere visivo) ma è anche supportata dall'interazione termoisometrica tra spazio interni ed

4. DIRETTIVA 2002/91/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 16 dicembre 2002 sul rendimento energetico nell'edilizia. L'obiettivo della presente direttiva è promuovere il miglioramento del rendimento energetico degli edifici nella Comunità, tenendo conto delle condizioni locali e climatiche esterne, nonché delle prescrizioni per quanto riguarda il clima degli ambienti interni e l'efficacia sotto il profilo dei costi. Le disposizioni in essa contenute riguardano: a) il quadro generale di una metodologia per il calcolo del rendimento energetico integrato degli edifici; b) l'applicazione di requisiti minimi in materia di rendimento energetico degli edifici di nuova costruzione; c) l'applicazione di requisiti minimi in materia di rendimento energetico degli edifici esistenti di grande metratura sottoposti a importanti ristrutturazioni; d) la certificazione energetica degli edifici; e) l'ispezione periodica delle caldaie e dei sistemi di condizionamento d'aria negli edifici, nonché una perizia del complesso degli impianti termici le cui caldaie abbiano più di quindici anni.

Fonte : <http://eur-lex.europa.eu>

Diagrama de un sistema de calefacción solar pasiva. El diagrama muestra una casa con un techo inclinado que recibe radiación solar directa (rayos rojos) y difusa (rayos amarillos). El sistema incluye un colector solar (colector de placa) que calienta un fluido (líquido rojo) que circula por tuberías (líneas azules) hacia un acumulador (tanque de almacenamiento) y luego hacia radiadores (radiadores) dentro de la casa. El acumulador también puede recibir agua fría de un depósito (depósito de agua fría) y suministrar agua fría a un sistema de refrigeración (sistema de refrigeración). El diagrama también muestra un sistema de ventilación (ventilación) que utiliza la energía solar para calentar el aire que circula por el sistema.

1.1.1 L'innovazione e la sostenibilità dei prodotti edili

5. Il Protocollo ITACA permette di stimare il livello di qualità ambientale di un edificio di nuova realizzazione oppure di uno ristrutturato, misurandone le prestazioni rispetto a criteri e sottocriteri.

6. Leadership in Energy and Environmental Design - è un sistema di certificazione degli edifici che nasce su base volontaria. Nasce in America ad opera di U.S. Green Building Council (USGBC), in Italia grazie al lavoro di GBC Italia che ne ha creato una versione locale, indicando i requisiti per costruire edifici ambientalmente sostenibili, sia dal punto di vista energetico che dal punto di vista del consumo di tutte le risorse ambientali coinvolte nel processo di realizzazione.

- mantenimento delle murature, solai e coperture esistenti
- mantenimento del 50% degli elementi non strutturali interni
- gestione dei rifiuti da costruzione

12

- riutilizzo dei materiali
- contenuto di riciclato
- materiali estratti, lavorati e prodotti a distanza limitata (materiali regionali)

Nella sezione Qualità ambientale interna viene considerata la qualità dell'ambiente interna rispetto alle prestazioni di sicurezza e benessere; tra tutti i criteri per l'assegnazione del punteggio⁷, quello più utile ai fini della tematica di gestione dei materiali è la bassa emissività di sostanze nocive per gli adesivi, i sigillanti, i materiali cementizi, le finiture per legno, le pitture, i prodotti derivati del legno e le fibre vegetali.

La riduzione dei consumi energetici quindi si basa sia sul risparmio e la valorizzazione delle materie prime che sullo sviluppo di nuove tecnologie. Il binomio innovazione tecnologica e sviluppo sostenibile⁸ rappresenta una chiave di lettura della sostenibilità. Quando parliamo di sostenibilità ci riferiamo al processo che coniuga e fa interagire tre dimensioni fondamentali, quali:

- La **Sostenibilità ambientale**, ovvero la capacità di preservare nel tempo le tre funzioni dell'ambiente cioè la funzione di fornitore di risorse, ricettore di rifiuti e la funzione di fonte diretta di utilità
- La **Sostenibilità economica** definita come la capacità di un sistema economico di generare una crescita duratura degli indicatori economici, cioè produrre reddito e lavoro per il sostentamento delle popolazioni.

STRAW_WIND *Ventilated roof*
Sviluppo e sperimentazione di un sistema/componete
per coperture ventilate ecosostenibili
prodotte dalla conversione "by products" della paglia

7. Criteri di assegnazione dei punti:

- Controllo ambientale del fumo di tabacco(prerequisito, obbligatorio)
- Monitoraggio della portata dell'aria di rinnovo
- Incremento della ventilazione
- Piano di gestione IAQ: fase costruttiva
- Piano di gestione IAQ: prima dell'occupazione
- Materiali basso emissivi: Adesivi, primers, sigillanti, materiali cementizi e finiture per legno
- Materiali basso emissivi: pitture
- Materiali basso emissivi: pavimentazioni
- Materiali basso emissivi: prodotti in legno composto e fibre vegetali
- Controllo delle fonti chimiche ed inquinanti indoor
- Controllo e gestione degli impianti: illuminazione
- Controllo e gestione degli impianti: comfort termico
- Comfort termico: progettazione
- Comfort termico: verifica
- Luce naturale e visione: luce naturale per il 75% degli spazi
- Luce naturale e visione: visuale esterna per il 90% degli spazi

8. Le tappe dello sviluppo sostenibile:

1968 - Il Club di Roma pubblica "I limiti dello sviluppo"

1972 - I Conferenza ONU sull'Ambiente Umano (Stoccolma)

1980- World Conservation Strategy (Nairobi)

1987 - Summit di Tokyo (Tokyo)

1992 - II Vertice ONU su Ambiente e Sviluppo (Rio de Janeiro); V Piano di Azione Ambientale "Per uno sviluppo durevole e sostenibile" (Bruxelles)

1994 - I Conferenza Europea sulle Città Sostenibili (Aalborg)

1996 - Seconda Conferenza Europea sulle città sostenibili (Lisbona);

1997 - Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (Kyoto)

2000 - III Conferenza Europea sulle Città sostenibili (Hannover)

2001 - III Conferenza Ambientale UE (Göteborg); Dichiarazione Universale sulla Diversità Culturale

2002 - World Summit on Sustainable Development (Johannesburg)

2004 - IV Conferenza Europea sulle città sostenibili (Aalborg)

2005 - Rilancio della strategia di Lisbona (1996) (Lussemburgo)

2009 - XV Conferenza delle Nazioni Unite dedicata al clima (Copenhagen)

2012 - Conferenza sullo sviluppo sostenibile Rio+20 (Rio de Janeiro)

- La **Sostenibilità sociale** - definita come la capacità di garantire condizioni di benessere umano (sicurezza, salute, istruzione) equamente distribuite per classi e per genere.

Il concetto di sviluppo sostenibile venne formulato per la prima volta nel 1987 nell'ambito della Commissione Mondiale Ambiente e Sviluppo (WCED) quando si concluse che ambiente e sviluppo non potevano essere considerate due sfide separate; la Commissione propose l'approccio allo sviluppo considerando le relazioni esistenti a livello ambientale, economico, sociale e del mondo tecnologico. Il concetto di Sviluppo Sostenibile venne definito con il Rapporto Brundtland come: " lo sviluppo che risponde alle necessità delle generazioni presenti, senza compromettere la capacità delle generazioni future di soddisfare le proprie esigenze" ; occorre fare interagire gli ambiti ambientali, sociali ed economiche, perseguendo l'equilibrio delle tre **"E": Ecologia, Equità, Economia** (Fig.4) si può raggiungere la sostenibilità; quindi, il perseguimento dello sviluppo sostenibile dipende dalla capacità della governance. Tale definizione parte da una visione antropocentrica, il focus del concetto della sostenibilità non l'ecosistema, quanto più la sopravvivenza e il benessere di tutte le specie viventi, piuttosto le generazioni umane. Nel 1991 la World Conservation Union, UN Environment Programme and World Wide Fund for Nature, propone una visione più globale, che lo identifica come: "un miglioramento della qualità della vita, senza eccedere la capacità di carico degli ecosistemi di supporto, dai quali essa dipende". Nell'evoluzione del concetto della sostenibilità ci sono le teorie proposte da Hermann Daly⁹ e Serge Latouche¹⁰, ma soprattutto c'è il passaggio ad una visione sistemica delle interrelazioni tra ambiente,

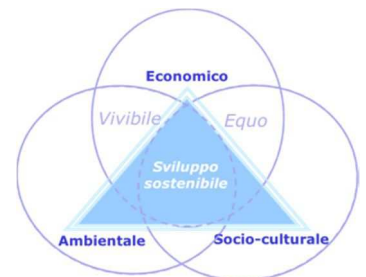


Figura 4. Interazione sfere dello sviluppo sostenibile

9. Herman Daly economista statunitense che nel 1991 ricondusse lo sviluppo sostenibile a tre condizioni generali concernenti l'uso delle risorse naturali da parte dell'uomo:

- il tasso di utilizzazione delle risorse rinnovabili non deve essere superiore al loro tasso di rigenerazione;
- l'immissione di sostanze inquinanti e di scorie nell'ambiente non deve superare la capacità di carico dell'ambiente stesso;
- lo stock di risorse non rinnovabili deve restare costante nel tempo.

10. Padre della teoria della decrescita sostiene l'impossibilità di pensare uno sviluppo economico basato sui continui incrementi di produzione di merci che sia anche in sintonia con la preservazione dell'ambiente, ritenendo che lo sviluppo sostenibile è una teoria superata e in ogni caso non più applicabile alle moderne economie mondiali.

economia e società, e quindi dalla visione di equilibrio si passa a una visione concentrica degli aspetti della sostenibilità che mette al l'economia al centro di tutto (Fig 5). L'innovazione tecnologica può essere considerata come il motore dello sviluppo economico; a seconda dell'oggetto specifico dell'innovazione è possibile distinguere le innovazioni in 3 tipi categorie:

- Innovazione di prodotto: quando si ha l'implementazione di nuovi prodotti o il miglioramento significativo di prodotti esistenti
- Innovazione di processo: quando si propongono nuove o migliorate modalità di produzione.
- Innovazione di mercato: quando si attuano delle strategie di vendita più efficaci

I modelli di sviluppo dell'innovazione si possono attuare secondo due modelli distinti:

- **Approccio Radicale**: è quello che comprende tutte le azioni che consentono di immettere sul mercato prodotti nuovi, innovati o che comunque non sono mai stati presenti sul mercato; sono governati dall'approccio innovativo della Technology Push¹¹ (Fig.6), cioè l'approccio che attraverso lo sviluppo di nuove tecniche o nuove combinazioni tecnologie definisce nuove applicazioni che mirano a promuovere prodotti e processi precedentemente non esistenti. L'innovazione TP ha come input la Ricerca e dello Sviluppo scientifico; l'approccio con Market pull si sviluppa a partire dalle esigenze di mercato. Il bisogno di soddisfare una reale esigenza di mercato richiede lo sviluppo di nuove conoscenze tecnico-scientifiche e quindi nuove soluzioni di prodotto, processo o servizio.

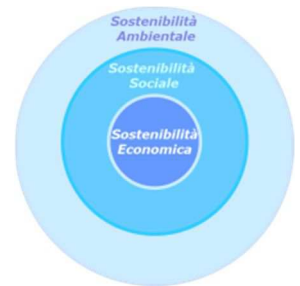


Figura 5. Equilibrio tra le sfere della sostenibilità

11. L'innovazione deriva dalla disponibilità di nuove conoscenze acquisite mediante la ricerca tecnico-scientifica, il processo di innovazione si sviluppa come una successione lineare di attività funzionali: ciascuna nuova opportunità scientifica da' origine ad applicazioni e miglioramenti che alla fine trovano collocazione sul mercato. Altro motore d'innovazione è l'approccio market pull, nel qual caso l'innovazione deriva dalla necessità di dare risposta a un nuovo bisogno da soddisfare, espresso da una domanda di mercato fortemente trainante.

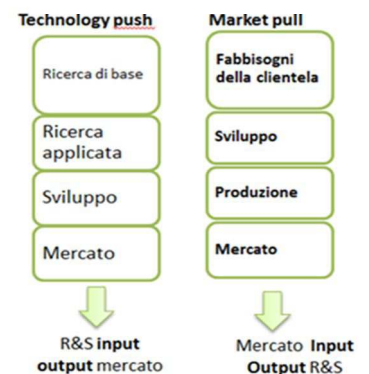


Figura 6. Confronto tra strategie di mercato. Elaborazione dell'autore

- **Approccio Incrementale:** si compone delle azioni che consentono di immettere sul mercato prodotti che migliorano le prestazioni, la qualità e l'adattabilità dei prodotti esistenti; favoriscono uno sviluppo integrato delle tecnologie, l'aumentata produttività e competitività dell'impresa migliorando l'efficienza di utilizzo di tutti i fattori della produzione. Proporre delle azioni finalizzate all'innovazione tecnologica si traduce nell'applicazione della strategia politica della Green Economy; il concetto di GE ha subito delle evoluzioni con il tempo, poiché si è passati dalla primordiale definizione di ramo delle strategie economiche caratterizzate dall'economia industriale che tutela l'ambientale mediante l'uso di fonti energetiche rinnovabili, a quella più complesso e articolato di strumento di gestione di tutti i settori della produzione di beni e servizi, sulla base di questa nuova visione, la Green Economy, viene schematizzata come l'ambito in cui capitale umano, capitale finanziario e il capitale ambientale sono in perfetto equilibrio (Fig. 7). Il analogia al beneficio prodotto dallo scenario della sostenibilità a lungo termine anche la diffusione delle strategie di GE si possono prospettare ricadute positive scenario futuro; l'adozione delle tecnologie verdi consente di uscire dalla crisi ambientale e economica, nel contesto edilizio con innovazione tecnologica verde si diffondono e lo sviluppo di modelli di produzione e materiali con alti livelli qualitativi.

Secondo UNEP¹² la GE è un economia che porta a : “ *un migliorato benessere umano e all'equità sociale, riducendo anche sensibilmente i rischi ambientali e le scarsità ecologiche*” e generando crescita e sviluppo occupazionale è eticamente . corretta e orienta l'economia verso l'utilizzo dell'eco-efficienza¹³.



Figura 7. La sostenibilità della politica della Green Economy, Elaborazione dell'autore.

12. La UNEP è un'organizzazione internazionale che opera dal 1972 contro i cambiamenti climatici a favore della tutela dell'ambiente e dell'uso sostenibile delle risorse naturali.

13. Secondo la definizione del WBCSD (World Business Council for Sustainable Development) L'eco-efficienza è la “capacità di ‘consegnare’ merci e servizi a prezzi competitivi, che soddisfino i bisogni umani e conducano ad una maggiore qualità della vita, riducendo progressivamente l'impatto ecologico e l'intensità d'uso delle risorse utilizzate durante il ciclo di vita fino ad un livello tale commisurato con la capacità di carico stimata del pianeta”. Per l'OCSE (Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico) è “l'efficienza con la quale le risorse ecologiche sono usate per andare incontro ai bisogni umani”. Per l'EEA (Agenzia Europea per le Imprese) è il “maggior benessere con minore utilizzo della natura”.

L'eco-efficienza secondo la definizione di Manzini e Vezzoli [1] può essere intesa come “rapporto tra il valore di un prodotto e il suo impatto ambientale” o come “grado con cui viene coniugata la riduzione dell'impatto per la produzione, distribuzione, uso e dismissione dei prodotti e dei servizi offerti, con il relativo aumento della qualità”. Puntare sulle caratteristiche eco-efficienti delle politiche di ricerca e sviluppo che interessano il settore delle costruzioni, vuol dire favorire i processi produttivi a ridotto impatto ambientale sia in termini di gestione delle risorse che in quello dei processi. Avvalersi delle BAT¹⁴-Best Available Techniques- consente di riformulare le economie dei processi produttivi, infatti, si può delineare un approccio produttivo non più di tipo lineare ma bensì di tipo circolare. La strategia economia circolare (Fig 8), rappresenta il principio su cui si fonda l'ecologia industriale.

L'eco-efficienza si raggiunge attraverso 7 condizioni:

1. Riduzione dell'intensità delle materie utilizzate;
2. Riduzione dell'intensità dell'energia utilizzata;
3. Riduzione della dispersione di sostanze tossiche;
4. Riciclabilità dei materiali;
5. Ottimizzazione nell'uso di risorse rinnovabili;
6. Aumento della durata del prodotto;
7. Aumento dell'intensità dei servizi.

Proporre il concetto di eco-efficienza per i prodotti edilizi significa fondare la progettazione del sistema edilizio su prodotti e sistemi costruttivi eco-compatibili; più in generale l'eco efficienza può dipendere

[1] E. Manzini, C. Vezzoli, Lo sviluppo di prodotti sostenibili, 1998

14. Secondo la Direttiva 96/61/CE le BAT sono “la più efficiente e avanzata fase di sviluppo di attività e relativi metodi di esercizio indicanti l'idoneità pratica di determinate tecniche a costituire, in linea di massima, la base dei valori limite di emissione intesi ad evitare oppure, ove ciò si riveli impossibile, a ridurre in modo generale le emissioni e l'impatto sull'ambiente nel suo complesso”.

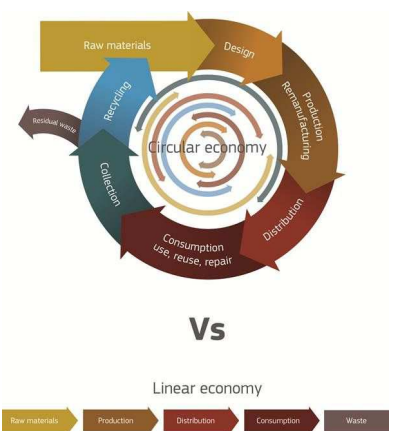


Figura 8 .Schematizzazione economia circolare ed economia lineare.

STRAW_WIND *Ventilated roof*
Sviluppo e sperimentazione di un sistema/componete
per coperture ventilate ecosostenibili
prodotte dalla conversione “by products” della paglia

da caratteristiche intrinseche dei prodotti (impieghi, LCA, prestazioni, rendimenti, messa in opera, ecc) sia dei processi produttivi (dematerializzazione¹⁵, lean production¹⁶). “Gli studi sull’eco-efficienza ottimizzano il rapporto costi/benefici di ogni prodotto, misurano e confrontano le tecnologie e i prodotti sulla base dell’impatto ambientale (le emissioni e lo sfruttamento delle risorse primarie) sia su quella della loro efficienza sul piano economico (costi ricavi)”¹⁷. Per valutare l’eco-efficienza dei prodotti edilizi si possono stabilire tre livelli di relazione, rispetto ai materiali, al processo produttivo ed infine rispetto alle ricadute sul sistema edilizio (Tab.1). Il concetto dell’eco-compatibilità racchiude in se l’eco-sostenibilità e la biocompatibilità del prodotto; sebbene spesso si tende ad assimilare i due termini è fondamentale precisare che sono concetti distinti: l’eco-sostenibilità può essere definita come: qualsiasi materiale, prodotto, attività o processo che nel suo divenire continuo mantiene inalterate le regole a fondamento della realtà ecosistemica in cui si trova ad agire. L’aggettivo biocompatibilità deriva dal greco “bios” che significa vita e del latino “cumpatire”, letteralmente la parola significa “partecipare alla vita”, quindi una possibile definizione del concetto potrebbe essere la seguente, qualsiasi materiale, prodotto, attività o processo che nel suo divenire continuo non provochi alterazioni al contesto naturale in cui si trova ma anche il controllo di qualsiasi effetto nocivo sulla vita, e in particolare sulla salute e il comfort dell’uomo. Limitando le considerazioni dalla norma UNI 11277:2008- Sostenibilità in Edilizia¹⁸ ai materiali, si possono definire i seguenti requisiti base:

- Utilizzo di materiali, elementi e componenti riciclati; deve essere previsto un elevato utilizzo di materiali, elementi e componenti riciclati per diminuire i rifiuti prodotti;

STRAW_WIND *Ventilated roof*
Sviluppo e sperimentazione di un sistema/componete
per coperture ventilate ecosostenibili
prodotte dalla conversione “by products” della paglia

15. Il concetto di dematerializzazione è stato usato in origine per indicare la corollazione virtuale dei titoli finanziari, allo stato attuale, parlare di dematerializzazione in ambito edilizio, significa impiegare minore energia e minore materia nei prodotti finiti e nei relativi processi di fabbricazione.

16. Lean production o Produzione snella è una metodologia di gestione che considera uno spreco la spesa per quelle risorse utilizzate per qualsiasi altro obiettivo che non sia la creazione di valore per il cliente, è una variazione sul tema dell’efficienza sulla base dell’ottimizzazione dei flussi, della riduzione degli sprechi e dell’utilizzo di metodi empirici per decidere ciò che conta davvero.

17. Cfr. Della Mura, C., & Simonato, E. (2012). *Architettura e nanotecnologie*. libreriauniversitaria.it ed.

Materiali
<ul style="list-style-type: none"> • Dematerializzazione- minore energia e materia per unità di prodotto • Risparmio energie e materiali in fase di realizzazione esercizio • Durabilità • Manutenibilità • Atossicità • Presenza di certificazioni • Possibilità di riuso e riciclabilità
Processo produttivo
<ul style="list-style-type: none"> • Dematerializzazione (minore energia e materia nei processi produttivi) • Disponibilità materie prime impiegate • Riduzione flussi di materiali • Riduzione emissioni nocive in fase di produzione • Riciclaggio e riuso degli scarti per una nuova produzione
Ricadute sul sistema edificio
<ul style="list-style-type: none"> • Recupero e ripristino di strutture ed edifici esistenti • Benessere termoisolante • Riduzione dei consumi energetici • Miglioramento delle condizioni di illuminazione • Riduzione dell’inquinamento acustico e atmosferico • Riduzione dell’inquinamento elettromagnetico

- Utilizzo di materiali, elementi e componenti ad elevato potenziale di riciclabilità¹⁹;
- Gestione ecocompatibile del cantiere; devono essere ridotti i consumi energetici e i livelli di inquinamento di aria, acqua, suolo e sottosuolo, in relazione alle diverse operazioni previste nel cantiere, dall'utilizzo delle risorse e delle diverse sostanze alla gestione rifiuti;
- Utilizzo di tecniche costruttive che facilitino il disassemblaggio a fine vita; occorre adottare sistemi costruttivi in grado di facilitare la separabilità dei componenti dell'edificio durante i processi di demolizione e recupero. Le possibilità di recuperare i materiali da costruzione alla fine del ciclo di vita dell'edificio dipendono dalle caratteristiche costruttive dell'edificio stesso.
- Riduzione degli impatti negativi nelle operazioni di manutenzione mediante un piano di manutenzione contenere prescrizioni relative alla riduzione degli impatti negativi nella gestione rifiuti, alla riduzione dell'utilizzo delle risorse e sostanze tossiche/nocive.
- Utilizzo di materiali, elementi e componenti caratterizzati da un'elevata durabilità; cioè devono avere una vita utile durevole rispetto alla vita utile dell'edificio.
- Gestione ecocompatibile dei rifiuti; occorre prevedere un piano di gestione del fine vita con indicazione specifiche sui materiali, elementi e componenti soggetti a raccolta differenziata, con successivo recupero e trattamento, rispetto alla massa totale dei rifiuti da costruzione e demolizione

18. Norma UNI 11277:2008
Sostenibilità in edilizia Esigenze e requisiti di ecocompatibilità dei progetti di edifici residenziali e assimilabili, uffici e assimilabili, di Nuova edificazione e ristrutturazione

19. Il grado di riciclabilità dipende dalle condizioni relative all'ubicazione del cantiere rispetto alle attività di trattamento e recupero dei materiali; dalla disponibilità di spazi nel cantiere di demolizione per la raccolta dei rifiuti e dei materiali recuperati; dalle tecniche costruttive con cui è realizzato il manufatto edilizio; dalle potenzialità dei materiali che costituiscono l'edificio di essere avviati a processi di recupero e/o riciclaggio; dalle condizioni relative alla vicinanza al sistema della viabilità.

1.1.2 Le strategie di produzione eco-orientate: Ecologia industriale

L'ecologia industriale è il motore delle strategie di produzione eco-orientate; attualmente con questo termine si considera l'insieme dei contributi multidisciplinari che hanno come obiettivo il perfezionamento del rapporto industria-ambiente; nella prassi l'adozione di questo approccio produttivo permette di compiere un passo in avanti rispetto al concetto di sostenibilità; riflettendo sull'incidenza ambientale del processo produttivo, si traduce in una maggiore attenzione di questa fase di vita del prodotto. L'esigenza di minimizzare la richiesta di risorse primarie incentiva la diffusione della simbiosi industriale²⁰ e la gestione a cascata degli output dei diversi sistemi produttivi che entrano in sinergia mediante la strategia della simbiosi industriale (Fig.9). La diffusione di questa metodologia ecologica di gestione del processo produttivo industriale si inizia a diffondere negli anni '70, ma solo sul finire degli anni '80 viene elaborato il concetto come oggetto di una disciplina scientifica. Proporre un'attività industriale "ecologica" significa proporre un modello di gestione delle risorse che non solo preveda l'impiego delle risorse in modo limitato, ma che sia caratterizzata da una produzione di rifiuti ridotta quasi a zero; il ciclo chiuso del processo produttivo è la peculiarità della strategia industriale. Nel 1992 Frosch avvalendosi di una analogia tra gli ecosistemi naturali e il sistema industriale afferma che si può avere l'eco-industria solo se è in grado di :

- ridurre la produzione di rifiuti nei processi;
- massimizzare l'impiego efficiente dei materiali di scarto e dei prodotti a fine vita;
- gestire gli input e output dei sistemi produttivi in modo da farli interagire tra di loro;

20. Si concentra sulla regolazione ed ottimizzazione dei flussi tra più industrie. Mira a promuovere un approccio ecologico sostenibile dello sviluppo industriale e al coinvolgimento di reti di imprese e di organizzazioni pubbliche e private coinvolte nelle economie locali e regionali, come azione pratica assume le industrie tradizionalmente isolate in un approccio collettivo per ottenere dei benefici competitivi che implicano scambi fisici di materiali, energia, acqua e/o sottoprodotti.

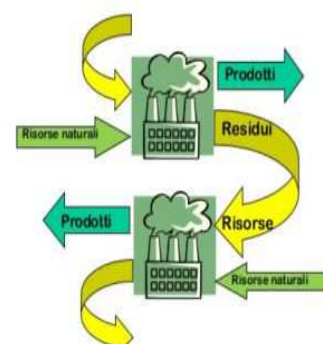


Figura 9. Schematizzazione della sinergia di simbiosi industriale

progettare dei prodotti finalizzati al riciclo/riuso a fine vita.

Negli stessi anni Ayres spiega il concetto dell'ecologia industriale mediante l'interazione tra biosfera e tecnosfera (Fig10): l'autore sostiene che per rendere efficiente il mondo industriale occorre che la tecnosfera caratterizzi sia la filiera produttiva che quella della biosfera, ovvero non produca rifiuti e non richieda l'ausilio di molte risorse. La biosfera non genera e non disperde le risorse. La convergenza e la ciclicità della gestione dei flussi potrà migliorare sia la gestione degli impatti che la gestione delle risorse. L'ecologia industriale può essere applicata attraverso strategie che riguardano il singolo prodotto (mediante LCA e LCD¹⁶) oppure all'intero processo produttivo (mediante Simbiosi industriale). In entrambi i casi viene comunque promosso un processo di trasformazione dei flussi e di energia e il relativo passaggio dal modello economico lineare a quello circolare (Fig 11).

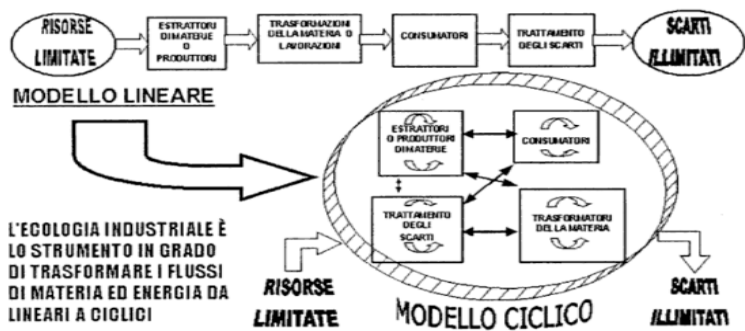


Figura 11. Modello ecologia industriale ciclo circolare. Fonte : I parchi eco-industriali: verso una simbiosi tra architettura, produzione e ambiente M. Franco [2]

Secondo M. Franco il sistema industriale può dirsi sostenibile se combina la biocompatibilità, la dematerializzazione e la non interferenza. Il concetto di " non interferenza" può essere chiarito

Biosfera	Tecnosfera
Ambiente	Mercato
Organismo	Azienda
Prodotto naturale	Prodotto industriale
Selezione naturale	Competizione
Ecosistema	Parco eco-industriale
Nicchia ecologica	Nicchia mercato
Anabolismo Catabolismo	Produzione Gestione rifiuti
Mutuaione Selezione	Eco-progettazione
Successione Ecologica	Crescita economica

Figura10. Similitudini tra biosfera e tecnosfera secondo Ayres

16. Life Cycle Design criterio metodologico che integra i requisiti ambientali come requisiti progettuali

[2] M. Franco. I parchi eco-industriali: verso una simbiosi tra architettura, produzione e ambiente

attraverso i concetti di tecnociclo e biociclo proposti da Manzini e Vezzoli, i quali definiscono l'economia industriale come :

“sistema di produzione e consumo organizzato in modo da approssimare il funzionamento del sistema naturale combinando tra loro tecnocicli e biocicli”

i tecnocicli sono caratterizzati dalla “non – interferenza” con i cicli naturali, poiché i processi del tecnociclo sono “chiusi su se stessi”

ovvero “riusano e riciclano tutti i materiali” nello stesso ciclo o comunque in cicli industriali;

i biocicli integrano la produzione artificiale nei cicli naturali utilizzando risorse rinnovabili e materiali biocompatibili e biodegradabili. Lo scenario di fine vita del prodotto è infatti quello biologico: attraverso la biodegradabilità il prodotto può essere smaltito senza diventare un rifiuto.

1.1.3 L'ecologia industriale e il metabolismo biologico dei prodotti

In questo scenario produttivo dove l'innovazione di prodotto e di processo è attuata attraverso l'ecologia e l'industria, trova spazio una teoria sulla sostenibilità di prodotto ancora più radicale e innovativa. Fino alla diffusione della teoria dalla culla alla culla di W. McDonough e M. Braungart l'impatto ambientale dei prodotti veniva valutato dalla culla alla tomba, cioè dalla fase di pre-produzione a quella di dismissione. Mc Donough e Braungart affermano che per ottenere prodotti sostenibili occorre una progettazione “biologica” del fine vita.

“Il nutrimento biologico è un materiale o un prodotto progettato per ritornare nel ciclo biologico per essere letteralmente consumato dai microorganismi del suolo o da altri animali”²¹.

21. Cfr. McDonough, W. e Braungart, M., Dalla culla alla culla. Come conciliare tutela dell'ambiente, equità sociale e sviluppo, Torino, Blu Edizioni, 2003, pag. 101.

Accanto alla prospettiva di conversione del ciclo produttivo da ciclo aperto tipicamente industriale (Fig 12) a ciclo chiuso tipico della natura (Fig 13) si colloca la trasformazione della tecnologia posta in essere nel ciclo produttivo del prodotto; infatti, dalla tecnologia end-of-pipe²² tipica dell'industria tradizionale si passa all'uso delle tecnologie Cleaner Production. Ciò che contraddistingue la prima struttura tecnologica è la gestione del problema dell'inquinamento alla fine della filiera produttiva nella seconda tecnologia prevale il principio di precauzione dell'inquinamento, l'impatto ambientale del prodotto viene controllato agendo a monte della fase produttiva, predisponendo l'uso efficiente delle risorse e la riduzione dei rifiuti. Si propone qui di seguito una schematizzazione delle principali differenze tra i due metodi produttivi.

End of Pipe	Cleaner Production
Minimizzazione degli effetti a valle del processo produttivo	Prevenire gli effetti
Minimizzazione rifiuti	Prevenire i rifiuti
Costi ridotti	Prevenire la spesa
Contromisure all'uscita	Verifica degli Input e degli output
Processo produttivo esistente	Modifica del processo produttivo
Individuare i problemi d'inquinamento	Modificazione del processo produttivo per minimizzare i rifiuti
Tabella 2 . Sintesi delle principali differenze tra le tecnologie End of Pipe e quella Cleaner Production	

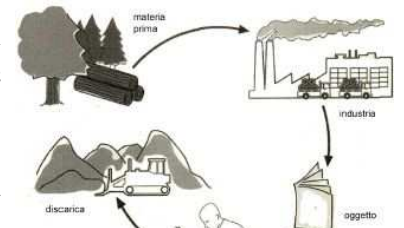


Figura 12. Ciclo aperto-produzione di rifiuti

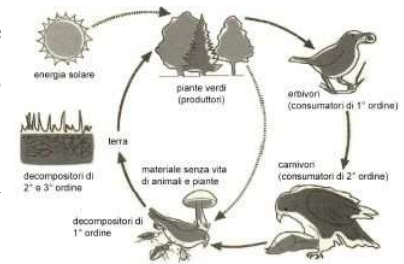


Figura 13. Ciclo chiuso - assenza di rifiuti

22. E' una Tecnologia che viene utilizzata per ridurre gli inquinanti e rifiuti al termine dei processi industriali di produzione. Il trattamento degli inquinanti in questa tecnologia ormai obsoleta avviene a valle dei processi produttivi. L'innovazione tecnologica di processo propone le clean technology, ovvero le tecnologie pulite che indicano prodotti, processi o servizi che riducono i rifiuti e che richiedono il minor numero di risorse non rinnovabili come possibile.

1.2 Azioni politiche e normative

Nell'ambito delle politiche ambientali possiamo individuare quelle che Manzini e Vezzoli definiscono come le "Politiche di seconda generazione", ovvero quelle *"tendenti a riorientare lo sviluppo del sistema di produzione e consumo su cui è basata la società odierna verso l'obiettivo di sostenibilità, partecipando alla determinazione delle politiche economiche, industriali, sociali"*. Ciò che si intende fare con queste nuove politiche è affrontare la questione ambientale mediante l'individuazione di strategie tecniche, economiche e culturali. Tra gli strumenti che caratterizzano questa nuova visione ci sono:

- le politiche integrate d'intervento (IPP);
- il Green Public Procurement (GPP);
- le politiche di processo (EMAS);
- le Politiche ambientali di prodotto (POEMS).

1.2.1 La Politica Integrata di Prodotto -Integrated Product Policy -

Per poter incentivare l'uso di prodotti eco-innovativi²³ e quindi mettere in campo le politiche di uso razionale delle risorse e la riduzione dei rifiuti è bene avvalersi delle Politiche Integrate di Prodotto (IPP); la IPP è una strategia europea promossa mediante la Comunicazione 2003/302 usata per rafforzare e orientare le politiche ambientali riguardanti i prodotti e i servizi per promuovere lo sviluppo di un mercato più "ecologico"; l'approccio integrato delle politiche ambientali risiede nel miglioramento continuo delle prestazioni ambientali dei prodotti (merci e servizi) nel contesto dell'intero ciclo di vita. I vantaggi perseguibili con la IPP riguardano: la qualità del prodotto, i costi, il

23. I modelli eco-innovativi sono definiti come l'insieme di metodologie, strumenti, opzioni tecnologiche ed organizzative che permettono ad un'impresa o ad un'organizzazione di innovare i propri processi, prodotti e servizi riducendo il proprio impatto sull'ambiente. Le imprese rappresentano un settore chiave per introdurre e diffondere processi di eco-innovazione per la loro influenza sia sulle logiche di mercato che sull'ambiente

STRAW_WIND *Ventilated roof*
Sviluppo e sperimentazione di un sistema/componete
per coperture ventilate ecosostenibili
prodotte dalla conversione "by products" della paglia

grado di soddisfazione del cliente, l'innovazione di processo e di prodotto. Le parole chiave della strategia sono:

- LCA
- mercato
- integrazione

Il pensiero Life Cycle Thinking del prodotto consente di comprendere gli impatti ambientali dello stesso in tutte le sue fasi. La riduzione dell'uso delle risorse e della produzione dei rifiuti produce delle riflessioni sui processi produttivi che possono essere in continuo miglioramento; le aziende possono migliorare la propria posizione in termini di costo-efficacia, cosicché non occorre creare nuovi strumenti di controllo e certificazione dei prodotti ma attivare in modo efficace quelli già esistenti, dagli strumenti volontari a quelli normativi, (Ecolabel, EMAS, DAP, Green Public Procurement). Ulteriori azioni che consentono di ridurre l'impatto ambientale dei prodotti nell'arco dell'intero ciclo di vita, riguardano la promozione della cooperazione tra i vari enti coinvolti, ma anche una maggiore collaborazione con il mercato che attraverso l'introduzione di incentivi può orientare le scelte verso soluzioni più sostenibili, incoraggiando la domanda e l'offerta di prodotti più ecologici e premiando le imprese più innovative e impegnate a promuovere lo sviluppo sostenibile. La Politica Integrata mira a superare l'approccio tradizionale delle politiche ambientali della relativa produzione *end of- pipe* dei processi produttivi avvalendosi della metodologia LCA.

E' infatti possibile controllare e gestire gli impatti ambientali per ogni prodotto; la Pubblica Amministrazione ha un ruolo attivo nella buona riuscita della IPP, a livello nazionale, lo sviluppo delle IPP si persegue con l'adozione del Piano Nazionale per il GPP²⁴ e con l'avvio di un

24. "l'approccio in base al quale le Amministrazioni Pubbliche integrano i criteri ambientali in tutte le fasi del processo di acquisto, incoraggiando la diffusione di tecnologie ambientali e lo sviluppo di prodotti validi sotto il profilo ambientale, attraverso la ricerca e la scelta dei risultati e delle soluzioni che hanno il minore impatto possibile sull'ambiente lungo l'intero ciclo di vita".

lavoro a livello interministeriale per la predisposizione di un Piano Nazionale per Produzione e Consumo Sostenibili, in linea con le tendenze europee.

1.2.2 Gli acquisti verdi (Green Public Procurement – GPP)

Sono i principali strumenti di politica ambientale individuati all'interno dell'IPP e hanno un ruolo decisivo nella diffusione di un mercato e di una cultura più attenta alla tutela ambientale;

L'obiettivo dei GPP è quello di integrare le considerazioni di carattere ambientale all'interno dei processi di acquisto delle PA; nella fattispecie la Pubblica Amministrazione può intraprendere iniziative, nell'ambito delle proprie politiche per la sostenibilità e tutela dell'interesse collettivo, orientando la produzione e i prodotti verso criteri di ecologicità. Sempre più amministrazioni impongono le strategie di GPP negli appalti pubblici chiedendo ai fornitori di contribuire alla qualità del servizio dell'ente e allo sviluppo delle politiche mediante una "value for money", ovvero di convenienza qualità-prezzo e non più solo di prezzo come avveniva in passato.

1.2.3 Politiche ambientali di processo: Environmental Management Systems

E' un sistema volontario di gestione ambientale basato sulla norma ISO 14001:2004²⁵; è stato introdotto dal Regolamento CE n. 1221/2009²⁶ ed è orientato

- all'introduzione e all'attuazione di un Sistema di Gestione Ambientale (SGA)²⁷ all'interno dell'organizzazione;
- una razionalizzazione dei processi organizzativi;

STRAW_WIND Ventilated roof
Sviluppo e sperimentazione di un sistema/componente
per coperture ventilate ecosostenibili
prodotte dalla conversione "by products" della paglia

25. La norma ha per oggetto: "Sistemi di Gestione Ambientale – Requisiti e guide per l'uso", essa fornisce i requisiti standard per la certificazione di un sistema di gestione ambientale, la prima pubblicazione avvenne nel 1996²⁴. Lo standard ISO 14001 è uno strumento di certificazione volontaria, rilasciato da un organismo di certificazione accreditato che attesta la conformità ai requisiti in essa contenuti; non attesta una particolare prestazione ambientale, ma dimostra che l'organizzazione certificata ha un sistema di gestione che tiene sotto controllo gli impatti ambientali delle proprie attività. La ISO 14001 non è una certificazione di prodotto. La norma ha subito una revisione nel 2015

26. Il Regolamento stabilisce che ciascuno Stato membro designi l'Organismo competente cui spetta l'esecuzione dei compiti previsti dal Regolamento stesso. In Italia, l'Organismo competente è attribuita al Comitato Ecolabel-Ecoaudit, (DM 413/95) che esercita delle proprie funzioni con il supporto tecnico dell'ISPRA.

27. Sono procedure che permettono alle imprese, agli Enti e alle organizzazioni di monitorare i principali impatti ambientali dovuti alle proprie attività. L'obiettivo di queste procedure non è solo il rispetto delle normative vigenti, ma il miglioramento continuo delle proprie prestazioni in termini di riduzione delle fonti di inquinamento, dei rifiuti, dei consumi energetici e delle materie prime.

- una trasparente illustrazione di prestazioni ambientali, mediante un documento di accesso pubblico.

L'adesione allo standard ISO14001:2004 è utile per definire una strategia ecologica, prendendo in considerazione la riduzione degli impatti e predisponendo sistemi di monitoraggio e controllo degli effetti dovuti alle attività svolte in rapporto all'ambiente e alla sicurezza. Oltre agli standard della Norma UNI anche quelli stabiliti dal regolamento EMAS (Environmental Management & Audit Scheme), è previsto un riconoscimento formale, da parte di un verificatore accreditato. I sistemi volontari di eco-gestione assicurano che il sistema di gestione ambientale sia stato realizzato sulla base dei reali impatti ambientali dell'organizzazione e che l'impegno al miglioramento sia continuo e concreto

Regolamento EMAS	Certificazione ISO 14001
Sistema volontario regolamentato a livello comunitario	Sistema volontario
Standard Europeo	Standard Internazionale
Validità Europea	Validità mondiale
Dichiarazione ambientale pubblica obbligatoria	Rapporto Ambientale volontario
Controllo sul sistema affidato ad un Comitato (organismo interministeriale) e ANPA	Controllo sul sistema affidato a SINCERT
Rispetto della normativa cogente Condizione essenziale	Impegno a rispettare la normativa cogente
Tabella 3. Differenze tra il regolamento EMAS e la Certificazione ISO (Fonte : Sala, S., & Castellani, V.)	

[3] Sala, S., & Castellani, V. Atlante dell'ecoinnovazione. Metodi, strumenti ed esperienze per l'innovazione, la competitività ambientale d'impresa e lo sviluppo sostenibile: Metodi, strumenti ed esperienze per l'innovazione, la competitività ambientale d'impresa e lo sviluppo sostenibile. Franco Angeli. 2011

1.2.4 Politiche ambientali di prodotto: Sistemi di Gestione Ambientale Product-Oriented Environmental Management Systems

I Sistemi di Gestione Ambientale (Product-Oriented Environmental Management Systems), strumenti di gestione volontaria promossi dalle Politiche ambientali dell'UE specifici sul prodotto, sono simili agli strumenti di gestione ambientali EMAS e SGA, ma prevedono l'estensione dell'influenza aziendale sui potenziali aspetti ambientali anche al di fuori del proprio stabilimento. Hanno la caratteristica di coniugare la flessibilità dei tradizionali sistemi di gestione ambientale (ISO 14001, EMAS, ecc.) con i vantaggi delle etichettature ecologiche di prodotto (Ecolabel, EPD, ecc.). Per raggiungere l'obiettivo dell'integrazione delle politiche di prodotto nella gestione aziendale. Le caratteristiche di un POEMS delineano uno strumento volontario diverso da EMAS e da EN ISO 14001 ma potenzialmente certificabile fondato sulla LCA del prodotto o del servizio. Inoltre, prevede che sia emesso un rapporto ambientale di prodotto che contiene sia i dati ambientali che gli impegni di miglioramento. A differenza di un SGA il POEMS è più efficace sul piano ambientale; elimina il rischio di trasferire da una fase all'altra del ciclo di vita di un prodotto i relativi impatti e semplifica gli aspetti formali delle procedure, inoltre, ha un collegamento diretto al prodotto e quindi un utilizzo più efficace in termini commerciali. Dal punto di vista strategico, valutare l'ecosostenibilità dei prodotti congiuntamente ai modi di produzione delle aziende coinvolte contribuisce ad estendere il concetto di miglioramento continuo all'intero ciclo di vita del prodotto.

1.2.5 La marcatura CE dei prodotti da costruzione

La Direttiva Europea 89/106/CEE è stato il principale riferimento della normativa disciplinante la produzione, commercializzazione e libera circolazione dei prodotti nell'ambito della Comunità Europea; Il marchio CE (Fig.12) accompagna il prodotto da costruzione e ne attesta la sua conformità ai sei "Requisiti Essenziali dei Prodotti"²⁸ ma non è equiparabile a una certificazione di prodotto, perché non è rilasciato da un organismo di certificazione, pertanto non esprime la qualità ecologica del prodotto finale. A partire dal 2013 i prodotti edilizi devono essere conformi al Regolamento UE n.305/2011²⁹.

Il Regolamento ha applicazione immediata, è assimilabile agli strumenti legislativo; quindi non necessita del recepimento da parte degli Stati Membri; la sua validità è applicata in tutti i paesi dell'Unione Europea i quali sono tenuti ad armonizzare eventuali disposizioni di legge in contrasto con esso. Tra le principali novità introdotte dal Regolamento, in primis l'introduzione di un settimo Requisito "*Uso sostenibile delle risorse naturali*"; inoltre, con il CPR il fabbricante del prodotto si assume responsabilità della veridicità dei dati forniti con la marcatura CE.

Il requisito *Uso sostenibile delle risorse naturali*, identifica una serie di indicatori relativi alla sostenibilità del prodotto, quali:

- riutilizzo e/o riciclabilità delle opere di costruzione,
- riutilizzo e/o riciclabilità dei loro materiali C&D;
- durabilità delle opere di costruzione;
- uso nelle opere di costruzione, di materie prime e secondarie ecologicamente compatibili.



Figura 14. Logo marchio CE

28. La marcatura accompagna il prodotto da costruzione e ne attesta la sua conformità ai sei "Requisiti Essenziali dei Prodotti" ovvero:

- Resistenza meccanica e stabilità;
- Sicurezza in caso d'incendio;
- Igiene, salute e ambiente;
- Sicurezza nell'impiego;
- Protezione acustica;
- Risparmio energetico e Isolamento termico.

29. (CPR - Construction Products Regulation) fissa condizioni armonizzate per la commercializzazione dei prodotti da costruzione, con una particolare attenzione alle piccole e microimprese e alla difesa della salute dei lavoratori, dei consumatori e dell'ambiente,

1.3 L' edilizia sostenibile e l' eco-compatibilità delle costruzioni

Lo sviluppo dei prodotti edilizi naturali rappresenta una tappa essenziale nel processo di “sostenibilità” del settore edilizio. Spesso si considera sostenibile un sistema edilizio composto da prodotti “naturali” tuttavia più che dalla presunta naturalità del prodotto (definizione attribuita spesso per l'origine della materia prima della materia prima) si dovrebbe approfondire l'aspetto dell'“ecologicità” del materiale; l'ecologicità dipende dal profilo ambientale ovvero l' ecoprofilo del prodotto; quando parliamo dell'eco-profilo si esegue una valutazione LCA ossia dagli impatti ambientali generati nella fase di produzione del materiale. Secondo quanto proposto da Gottfried, nella valutazione dei materiali da costruzione si devono considerare: l'uso delle risorse e i livelli di inquinamento; in merito alla prima voce “uso delle risorse” si osserva: la disponibilità della materia prima, il consumo energetico primario, la qualità dell'energia impiegata, la durabilità e la riciclabilità; il livello di inquinamento invece comprende: l'inquinamento che si ottiene in fase di pre-produzione della materia prima, sul luogo di costruzione , negli ambienti ed infine l'inquinamento prodotto a fine vita quando il prodotto diventa rifiuto. In generale gli strumenti di valutazione dei materiali edilizi considerano l'incidenza degli impatti sulla biologia umana (radioattività, esalazione di gas, polveri sottili, alterazioni climatiche); sui criteri chimico fisici dei prodotti (capacità di assorbimento, comportamento statico, reazione all'umidità);

La qualità abitativa può essere migliorata beneficiando di scelte tecnico-costruttive che mirano all'impiego di materiali rinnovabili, riciclabili e a basso contenuto energetico; sorgenti alternative di energia, potenziamento dell'efficienza energetica, diffusione di un approccio

ambientale al progetto nella sua totalità. Le soluzioni tecnologiche che compongono la costruzione eco-compatibile devono seguire gli obiettivi si :

- ottimizzazione dell'uso delle risorse
- contenimento e/o recupero dei rifiuti
- risparmio energetico
- riduzione dell'inquinamento

In sintesi i criteri di analisi per la valutazione della qualità ecologica dei materiali da costruzione possono essere considerati in base alle caratteristiche:

ecologiche: compatibilità, riciclabilità, smaltibilità, durevolezza

tecniche: resistenza, coibenza, adeguatezza igieniche: assenza di emissioni nocive, salubrità.

La disciplina dei prodotti edilizi Eco-compatibili viene affidata a norme e le leggi sia nazionali che europee; A livello di normative locali e cioè di amministrazione politica comunale, l'orientamento delle scelte verso i prodotti eco-compatibile può essere gestito attraverso le disposizioni dei regolamenti edilizi, infatti in Italia si riscontra una crescita dei comuni che inseriscono nei propri strumenti regolatori i requisiti ambientali del prodotto. I comuni che secondo il rapporto prodotto dall'Osservatorio Nazionale sui Regolamenti Edilizi hanno introdotto dei criteri di innovazioni in merito all'energia e alla sostenibilità del settore edilizio sono 1.003, cioè il 12,4% del totale dei Comuni italiani per una popolazione complessiva che supera i 21 milioni di abitanti, tuttavia verificando l'andamento delle innovazioni sostenibili su un lasso di tempo di 5 si registra una crescita di quasi 5 volte in tra i valori del 2008 (188 comuni) e quelli del 2011(circa 1000). Nello specifico in 446 comuni sono state fissate delle condizioni sui materiali da costruzione

inspiegati; in 28 comuni si è imposto impongono l'uso di materiali locali, mentre in 50 comuni vengono considerati degli sconti sugli oneri di urbanizzazione se si impiegano una quota di materiali riciclabili per la realizzazione dell'edificio. Comuni che dispongono in tema di materiali da costruzione ecocompatibili, sono principalmente nelle aree del nord, la regione capofila è la Lombardia con 193 comuni, seguono Toscana (75), Emilia-Romagna (61), Piemonte (28), Veneto (18) e Lazio (17). I numeri delle regioni del sud che legiferano sulla natura dei materiali nei regolamenti edilizi sono molto inferiori: Puglia (9), Campania (7), Basilicata (5). In sintesi la diffusione geografica degli 1.003 Comuni evidenzia che in 679 regioni del Nord vengono adottati regolamento edilizi "sostenibili", al Centro se ne riscontrano 247 ed al Sud 77 comuni. Ampliando il campo d'indagine alle disposizioni sovracomunali è bene ricordare che la disciplina della sostenibilità ambientale del prodotto del settore edilizio si avvale di un ricco corpo normativo; le norme a seconda dell'ente proponente possono di tre livelli differenti:

- Norme ISO (agiscono sul contesto internazionale);
- Norme CEN(agiscono nell'ambito europeo)
- Norme UNI (sono disposizioni nazionali che devono essere armonizzate alle precedenti norme).

Le principali differenze che sussistono tra le disposizioni di legge e le norme risiedono nel carattere cogente delle prime e nella semplice prescrizione definita dalla seconda; la Direttiva Europea 98/34/CE del 22 giugno 1998 specifica che la norma è: "la specifica tecnica approvata da un organismo riconosciuto a svolgere attività normativa per applicazione ripetuta o continua, la cui osservanza non sia obbligatoria".

1.3.1 Il quadro normativo sull'eco-sostenibile e bio-compatibilità delle costruzioni

Accanto alle normative politiche per gestione ambientale dei dell'edilizia affrontate nel paragrafo 1.2 e agli strumenti volontari ³⁰ definiti con i criteri ambientali premiali con i punteggi che certificano la

qualità del prodotto e del sistema edilizio come la certificazione LEED, Protocollo ITACA, HQE, BREEAM, trovano spazio i percorsi normativi imposti dalle norme ISO, CEN e UNI; Tali norme attraverso il metodo di analisi LCA esprimono l'eco-compatibilità dell'intero sistema edilizio e dei singoli prodotti impiegati nella costruzione, esplicitando gli indicatori sintetici d'impatto³¹.

Le norme ISO sono il frutto di accordi internazionali che definiscono gli "International Standards" che saranno poi assimilati nelle norme nazionali dei singoli stati membro, sono promossi dall'associazione non governativa International Organization for Standardization con l'intento di promuovere lo sviluppo e l'unificazione normativa per consentire e facilitare lo scambio dei beni e dei servizi. Tra le norme ISO che devono essere rispettate per avere edifici e prodotti edilizi sostenibili si possono ricordare :

ISO/TS 21929-1:2010 Sustainability in building construction. Sustainability indicators. Framework for the development of indicators for buildings che è stata sostituita dalla ISO 21.929-1: 2011 adatta i principi di sostenibilità generali per gli edifici; include un framework per lo sviluppo di indicatori di sostenibilità per l'uso nella valutazione degli impatti economici, ambientali e sociali di edifici; determina gli aspetti a titolo oneroso quando si definisce un insieme di indicatori di sostenibilità per gli edifici; stabilisce una serie di indicatori; descrive come utilizzare

30. I sistemi volontari di valutazione multicriterio a punteggio dal punto di vista metodologico si basano sull'individuazione di un elenco di criteri ambientali (requisiti di progetto), definiti a partire dagli obiettivi ambientali di risparmio dei consumi di risorse (energia, materiali, acqua), di riduzione dell'inquinamento (emissioni in aria, in acqua e rifiuti solidi) e di tutela della salute umana.

31. Indicatori impatto ambientale:
Consumi di energia primaria;
emissione di rifiuti;
gas serra;
acidificazione;
eutrofizzazione;
formazione di ossidanti fotochimici.

STRAW_WIND *Ventilated roof*
Sviluppo e sperimentazione di un sistema/componente
per coperture ventilate ecosostenibili
prodotte dalla conversione "by products" della paglia

indicatori di sostenibilità; e dà le regole per la creazione di un sistema di indicatori.

ISO 21931-1:2010 Sustainability in building construction. Framework for methods of assessment for environmental performance of construction works – part1: Buildings, ha l’obiettivo di armonizzare i diversi strumenti di valutazione ambientale degli edifici e di introdurre la valutazione ambientale del ciclo di vita (LCA), integrando nella valutazione ambientale dell’edificio la certificazione ambientale di prodotto EPD (Environmental Product Declaration) secondo la norma ISO 21930:2007 Sustainability in building construction. Environmental declaration of building products(fig. 03).

ISO 15392:2008 Sostenibilità in edilizia - Principi generali.

La presente norma internazionale individua e stabilisce i principi generali per la sostenibilità nell’edilizia. Si basa sul concetto di sviluppo sostenibile, e si riferisce all’intero ciclo di vita dell’edificio, dalla nascita alla dismissione, tenendo in considerazione materiali, prodotti, servizi e processi relativi all’edificio. La presente norma internazionale non fornisce tuttavia i livelli (benchmark) che possano servire come base per la valutazione della sostenibilità (ISO 15392, 2008).

ISO 16745: 2015 Prestazioni ambientali degli edifici - Carbon metrica di un edificio fornisce requisiti per la determinazione e la segnalazione di una metrica di carbonio di un edificio esistente, associato al funzionamento dell'edificio. Essa definisce i metodi per il calcolo, il reporting, la comunicazione e la verifica di una serie di metriche di carbonio per le emissioni di gas serra derivanti dall'uso di energia misurata durante il funzionamento di un edificio esistente, l'uso di

energia misurato utenti connessi, e di altre emissioni di gas serra rilevanti.

ISO 14046: 2014 Gestione ambientale - impronta d'acqua - Principi, requisiti e linee guida, specifica i principi, i requisiti e le linee guida relative alla valutazione impronta idrica di prodotti, processi e organizzazioni basate sulla valutazione del ciclo di vita (LCA)

ISO / TS 14067: 2013 I gas serra - Carbon footprint di prodotti - specifica i principi, i requisiti e le linee guida per la quantificazione e la comunicazione delle emissioni di anidride carbonica di un prodotto (PCP), sulla base di standard internazionali in materia di valutazione del ciclo di vita (ISO 14040 e ISO 14044) per la quantificazione e sulle etichette ambientali e dichiarazioni (ISO 14020, ISO 14024 e ISO 14025) per la comunicazione.

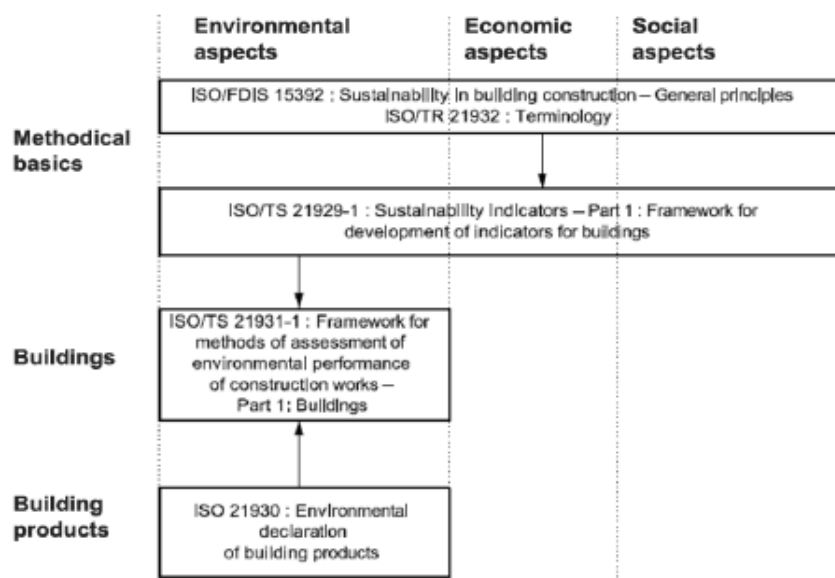


Figura 15. Quadro di sintesi dei lavori normativi in ambito ISO relativi alla sostenibilità degli edifici. fonte: Campioli, A.; Lavagna, M., Paleari M.(2014) RICERCA SULLA CARATTERIZZAZIONE AMBIENTALE DEI SISTEMI COSTRUTTIVI MINERALI YTONG E MULTIPOR.

STRAW_WIND *Ventilated roof*
Sviluppo e sperimentazione di un sistema/componete
per coperture ventilate ecosostenibili
prodotte dalla conversione “by products” della paglia

A livello europeo, il CEN (Comité Européen de Normalisation), rappresenta un livello di gestione della norma a scala Europea, queste norme sono armonizzate con le ISO e devono essere assimilate dalle norme nazionali, sono indicate con la sigla EN. Le norme UNI sono l'insieme delle norme nazionali italiane, sono prodotte dall'Ente Nazionale Italiano Unificatore UNI, altro ente accreditato a livello nazionale anche il CIT (Comitato elettronico italiano). I compiti principali dell'UNI sono: elaborare nuove norme in collaborazione con tutte le parti interessate; rappresentare l'Italia nelle attività di normazione a livello mondiale (ISO) ed europeo (CEN) allo scopo di promuovere l'armonizzazione delle norme; pubblicare e diffondere le norme tecniche ed i prodotti editoriali ad esse correlati.

A livello europeo, l'Organo Tecnico Preposto per definire le norme sulla sostenibilità dei lavori da costruzione è il CEN/TC 350, nello specifico è responsabile dell'elaborazione di metodi volontari orizzontali normalizzati per la valutazione degli aspetti di sostenibilità delle costruzioni ed è responsabile delle norme per la dichiarazione ambientale di prodotto dei prodotti da

costruzione. Le norme pubblicate sono:

prEN 15804:2008 Sostenibilità dei lavori di costruzione: Dichiarazioni ambientali di prodotto – Regole di categoria di prodotto.

prEN 15941:2010 Sostenibilità dei lavori di costruzione: Dichiarazioni ambientali di prodotto – metodi e dati generici.

prEN 15643-1:2010 Sostenibilità dei lavori di costruzione: Valutazione della sostenibilità degli edifici parte 1: Quadro generale.

prEN 15643-2:2010 Sostenibilità dei lavori di costruzione: Valutazione della sostenibilità degli edifici parte 2: Quadro per la valutazione delle

prestazioni ambientali. prEN 15643-3:2012 Sostenibilità dei lavori di

STRAW_WIND Ventilated roof

Sviluppo e sperimentazione di un sistema/componente

per coperture ventilate ecosostenibili

prodotte dalla conversione "by products" della paglia

costruzione: Valutazione della sostenibilità degli edifici parte 3: quadro per la valutazione delle performance sociali. prEN 15643-4: 2012 Sostenibilità dei lavori di costruzione: Valutazione della sostenibilità degli edifici parte 4: quadro per la valutazione dei risultati economici.

Le norme riportate non sono esaustive dell'intero corpo normativo prodotto dal CEN

Quadro normativo nazionale la normativa di riferimento

pubblicate a scala di edificio sono la UNI EN 15643 e la UNI

EN 15978 «Sostenibilità delle costruzioni», costituiscono uno

strumento di verifica della sostenibilità degli edifici e si basano

sull'approccio life cycle (Grosso, 2011).

La norma UNI 11277:2008 riguarda la “Sostenibilità in edilizia - Esigenze e requisiti di eco-compatibilità dei progetti di edifici residenziali e assimilabili, uffici e assimilabili, di nuova edificazione e ristrutturazione”. La norma definisce le esigenze di eco-compatibilità e i relativi requisiti in relazione alle fasi del processo edilizio (produzione di materiali, componenti ed elementi fuori opera e in opera, funzionale). Si applica ai progetti di edifici residenziali e assimilabili, uffici e assimilabili, sia di nuova costruzione sia di ristrutturazione.

Nell'allegato 1 raggruppa le norme in merito alle:

- Prestazione energetica degli edifici
- Prestazione termica degli edifici e dei componenti edilizi
- Prestazioni termoigrometriche dei materiali e dei prodotti per l'edilizia
- Isolamento termico

Fa inoltre riferimento alle classi di esigenze di

- salvaguardia ambientale³²;
- utilizzo razionale delle risorse³³;

32. Esigenze Salvaguardia dell'ambiente:
Salvaguardia della salubrità dell'aria e del clima
Salvaguardia del ciclo dell'acqua
Salvaguardia dell'integrità del suolo e del sottosuolo
Salvaguardia dei sistemi naturalistici e paesaggistici

33. Esigenze Utilizzo razionale delle risorse
Utilizzo razionale delle risorse derivanti da scarti e rifiuti
Utilizzo razionale delle risorse idriche
Utilizzo razionale delle risorse climatiche ed energetiche (requisiti geometrici e fisici)
Utilizzo razionale delle risorse climatiche ed energetiche (requisito energetico)

STRAW_WIND *Ventilated roof*
Sviluppo e sperimentazione di un sistema/componete
per coperture ventilate ecosostenibili
prodotte dalla conversione “by products” della paglia

- benessere, igiene e salute dell'utente³⁴

L'importanza di una trasformazione "ecologica" della produzione edilizia mostra la crescente esigenza di ampliare e modificare l'insieme di norme che disciplinano la gestione sostenibile del sistema edilizio, in questa sede si sono rispostate soltanto alcune delle norme di riferimento, la rassegna non rappresenta una analisi esaustiva di tutte le norme.

1.3.2 Strumenti di valutazione della sostenibilità del prodotto

La valutazione dei prodotti da costruzione apre un dibattito molto complesso ed articolato; Lo strumento accreditato per valutare gli impatti dei prodotti come già accennato in precedenza è l' LCA.

Il primo esempio di LCA risale agli anni '70 quando l'industria della Coca-Cola adottò questo strumento per verificare l'alternativa delle lattine in alluminio alla tradizionale bottiglia in vetro, allora l'analisi delle risorse e il profilo ambientale venne indicata con il nome REPA (Resources and Environmental Profile Analysis) . A partire dagli anni '90, l'esigenza di controllare gli impatti di qualsiasi tipo di prodotto sul sistema ambientale spinse l'ISO ad incaricare la società SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) di definire una famiglia di standard utili a codificare gli indicatori per l'analisi di impatto ambientale. La SETAC definisce l' LCA come *"un procedimento oggettivo di valutazione di carichi energetici ed ambientali relativi ad un processo o un'attività, effettuato attraverso l'identificazione dell'energia e dei materiali usati e dei rifiuti rilasciati nell'ambiente. La valutazione include l'intero ciclo di vita del processo o attività, comprendendo l'estrazione e il trattamento delle materie prime, la fabbricazione, il trasporto, la distribuzione, l'uso, il riuso, il riciclo e lo*

34. Esigenze Benessere , igiene e salute
Benessere termico negli spazi esterni e interni
Benessere visivo negli spazi esterni e interni
Benessere acustico degli spazi esterni e interni
Condizioni d'igiene ambientale connesse con le variazioni del campo elettromagnetico da fonti artificiali
Condizioni d'igiene ambientale connesse con l'esposizione ad inquinanti dell'aria interna

STRAW_WIND *Ventilated roof*
Sviluppo e sperimentazione di un sistema/componente
per coperture ventilate ecosostenibili
prodotte dalla conversione "by products" della paglia

smaltimento finale“. Nel 2006 l’ISO con la norma 14040 “Environmental management - Life cycle assessment”, specifica che l’LCA è la “*compilazione e valutazione attraverso tutto il ciclo di vita dei flussi in entrata ed in uscita, nonché i potenziali impatti ambientali di un sistema di prodotto*”. La procedura di valutazione LCA, secondo quanto stabilito dalle norme UNI EN ISO 14040, 14041, 14042 e 14043 si compone di quattro fasi principali (Fig. 16):

- 1) definizione degli obiettivi
(Goal Definition and Scoping);
- 2) analisi di inventario
(Inventory Analysis);
- 3) analisi degli impatti
(Life Cycle Impact Assessment - LCIA);
- 4) Interpretazione dei risultati-individuazione delle aree di miglioramento (Life Cycle Interpretation).

Nello specifico nella LCA di prodotto lo schema degli input ed output deve essere riferito a tutte le fasi produttive dall’estrazione delle risorse necessarie per la produzione dei materiali, fino all’ultimo trattamento degli stessi materiali dopo l’uso, ovvero si delinea una valutazione del prodotto dalla Culla alla culla³⁵.

Le fasi del ciclo di vita di un prodotto sono:

- Preproduzione
- Produzione
- Distribuzione
- Uso e Servizio
- Dismissione

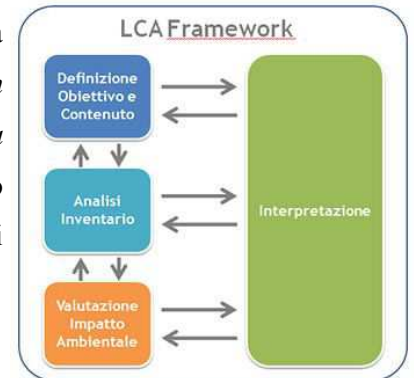


Figura 16. Fasi LCA

35. La definizione del concetto di LCA dalla culla alla culla è stata introdotta dagli autori W. McDonough e M. Braungart, i quali propongono una soluzione diversa, rispetto alla produzione di eco-orientata dei prodotti edilizi, ipotizza la progettazione di filiere che prevedano il reinserimento a monte dei materiali in successivi cicli produttivi.

Ad ogni fase può essere associata un'interazione con l'ambiente, in termini di consumo di energia, di acqua e di altre risorse naturali, di emissioni in atmosfera, di scarichi (Fig 17). Gli strumenti per valutare la sostenibilità possono essere distinti in tre grosse categorie :

- **Metodi basati sulla LCA**

comprende i metodi valutativi che considerano quantitativamente gli impatti ambientali dei processi e dei materiali.

- **Metodi multicriteria**

considera il soddisfacimento dei requisiti ambientali tramite l'utilizzo di specifici indicatori specifici di analisi, vengono assegnati dei punteggi in base al livello di eco-sostenibilità raggiunto.

Comprende le etichette ambientali di tipo volontario UNI EN ISO 14020:2002 , stabilisce le linee guida e i principi relativi alle procedure per lo sviluppo e l'applicazione di etichette e dichiarazioni ambientali di natura volontaria, definendone tre tipi:

etichette ambientali di tipo I (ISO 14024)	
CARATTERISTICHE	Rispetto di limiti prestazionali
VERIFICA	Ente terzo accreditato e indipendente
SCOPO	Selezione
DESTINATA	Al consumatore
UTILIZZO LCA	Nei criteri ecologici <u>Obbligatorio</u>
etichette ambientali di tipo II (ISO 14021)	
CARATTERISTICHE	Autodichiarazione del produttore
VERIFICA	Non richiesta
SCOPO	Informazione
DESTINATA	Al consumatore
UTILIZZO LCA	Non richiesta
etichette ambientali di tipo III (ISO 14025)	
CARATTERISTICA	Quantificazione degli impatti ambientali mediante LCA e specifici indicatori
VERIFICA	Ente terzo accreditato e indipendente
SCOPO	Informazione, quantificazione e comparazione
DESTINATA	Al consumatore e altre figure all'interno della filiera produttiva.
UTILIZZO LCA	

Tabella 4. Differenze tra i tre tipi di etichette ambientali. Elaborazione dell' autore

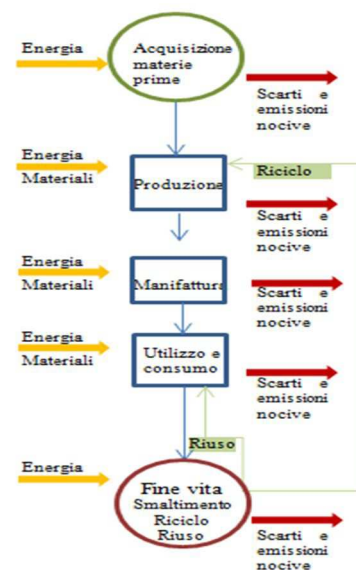






Figura 17. Schema LCA prodotti da costruzione. Elaborazione dell'autore

- **Metodi ad indicatori sintetici**

si basano su pochi indicatori, tutti di tipo quantitativo, attraverso i quali è possibile fare un bilancio ambientale di un prodotto mettendone in evidenza gli impatti.

Metodi basati sulla LCA	Metodi multicriteria	Metodi ad indicatori sintetici
Ecoindicator '99  EDIP 2003  EPS 2000  Empact 2002+ 	tipo I (ISO 14024) Ecolabel Der Blaue Nordic Swan NaturePlus ANAB/ICE tipo II (ISO 14021) Ciclo di mobius Pannello Ecologico ICMQ tipo III (ISO14025) EPD	MAIA MIPS Zaino Ecologico EE

TTabella 5. Riepilogo metodo di valutazione e strumenti di valutazione. Elaborazione dell' autore

1.3.2.1 Metodi basati sulla LCA

Eco-indicator 99 è stato realizzato dal Pré

(Product Ecology Consultants) per conto del Ministero dell'Ambiente olandese e rappresenta lo strumento più diffuso a

livello europeo, con questo metodo si quantificano gli impatti attraverso 3 indicatori sintetici:

STRAW_WIND Ventilated roof
 Sviluppo e sperimentazione di un sistema/componete
 per coperture ventilate ecosostenibili
 prodotte dalla conversione "by products" della paglia

- Human Health (Salute umana)³⁶
- Ecosystem Quality(Qualità dell'ecosistema)
- Resources (Risorse)

Il metodo Eco-indicator si avvale di un software, il SimaPro, sviluppato sempre dal Prè Consultant, tale supporto informatico consente di valutare l'impatto di un prodotto ad esempio in tutte le fasi di vita dello stesso è supportato da delle banche dati quali che contengono informazioni dettagliate sui materiali processi ed energie richieste per ottenere un prodotto database Prè standard, Buwal 250, ICE.

EDIP 2003 che è stato sviluppato dal governo danese nel '97 e nel 2003 è stato aggiornato, considera i seguenti impatti in egual misura:

- impatto ambientale
- consumo delle risorse
- impatto sull'ambiente di lavoro

Sono ulteriormente divisi a seconda della loro estensione geografica in: impatto globale, impatto regionale, impatto locale. Questa suddivisione consente di avere delle categorie di impatto multi scalari, Il consumo delle risorse non rinnovabili ad esempio è un impatto globale mentre l'impatto ambientale può essere determinato su 3 scale (globale, regionale o locale); per l'impatto sull'ambiente di lavoro si possono considerare gli impatti locali e alcuni casi regionali.

Eps 2000 è stato sviluppato dal Swedish Enviromental Research Institute, e valuta l'impatto mediante dei "midpoint" che definiscono la disponibilità a pagare per evitare che si verifichi un peggioramento delle

36. Il danno sulla salute dell'uomo considera i seguenti danni:

- Danni causati da sostanze cancerogene
- Danni causati da sostanza organiche alle vie respiratorie
- Danni causati da sostanza inorganiche alle vie respiratorie
- Danni causati dai cambiamenti climatici
- Danni causati dalle radiazioni ionizzanti
- Danni causati dall'assottigliamento dello strato d'ozono

condizioni ambientali e sulla salute umana; le categorie di danno in questo caso sono quattro:

- Human Health (Salute umana);
- Ecosystem Production Capacity (Capacità dell'ecosistema);
- Abiotic Stock Resource (Risorse abiotiche);
- Biodiversity (Biodiversità)

L'unità di misura usata per esprimere con questo metodo di valutazione l'impatto è ELU (Environmental Load Unit), cioè un indice che restituisce direttamente il valore monetario del danno.

Impact 2002+ è stato sviluppato dalla Swiss Federal Institute of Technology e rappresenta l'evoluzione del metodo eco-indicator 99, e considera l'impatto esprimendo il valore nei confronti di una sostanza di riferimento, mentre con la categoria Climate Change esprime i Kg CO₂ equivalenti.

EPS2000	EDIP 97.	Eco-99	Impact 2002+
Life expectancy Severe morbidity Morbidity Severe nuisance Nuisance Crop growth capacity Wood growth capacity Fish and meat production Soil acidification Prop. vap. irrigation water Prog.cap drinking water Depletion of reserves Species extinction	Global warming Ozone depletion Acidification Eutrophication Photochemical smog Ecotoxicity water acute Ecotoxicity water chronic Ecotoxicity soil chronic Human toxicity air Bulk waste Hazardous waste Radioactive waste Resources Slag/ashes	Carcinogens Respiratory inorganics Respiratory organics Climate change Ozone layer Ecotoxicity Acidification Eutrophication Minerals Fossil fuels	Human toxicity Respiratory inorganics Ionizing radiazions Ozone layer depletion Photochemical oxidation Aquatic ecotoxicity Terrestrial ecotoxicity Terrestrial acidificazio Aquatic acidification Aquatic eutrophication Global warming Non-renewable energy Mineral extracion Land occupation

Tabella 6. Riepilogo categorie d'impatto dei singoli metodi illustrati
Elaborazione dell' autore

1.3.2.2 Metodi multicriteria

Nell'ambito delle etichette di prodotto la prima etichetta istituita dalla Comunità Europea è il marchio **Ecolabel**. Esposto su tutti i beni di consumo e servizi per i quali attesta l'ecologicità secondo le disposizioni del Regolamento CE n. 66/2010, tale marchio premia i prodotti e i servizi che offrono una miglior prestazione ambientale a parità di standard prestazionali. I prodotti dotati di elevate caratteristiche ambientali sono contrassegnati dal simbolo del fiore (Fig.18)

I criteri ecologici, basati su studi di valutazione scientifica, riguardano i seguenti aspetti:

- consumo di energia,
- inquinamento idrico
- inquinamento atmosferico,
- produzione di rifiuti,
- gestione sostenibile del patrimonio boschivo
- inquinamento acustico
- inquinamento del suolo.

Il marchio è pubblico e viene concesso previa valutazione di un terzo ente³⁷, quindi non si tratta di un'autocertificazione del fabbricante. I criteri, fissati dal nuovo regolamento n. 1980/00, sono definiti a livello europeo per gruppi di prodotto/servizio, secondo un approccio globale che si estende a tutto il ciclo di vita (LCA) del prodotto in base alle finalità e ai principi generali che devono assicurare un elevato livello di tutela dell'ambiente, l'uso di tecnologie friendly l'opportunità di ottimizzare la vita del prodotto.

Blue Angel, una certificazione che riconosce al prodotto aspetti di salvaguardia ambientale, è prodotta dal governo tedesco dal 1978. Il marchio viene concesso in uso dall'ente tedesco RAL e controllato



Figura 18. Logo Ecolabel

37. In Italia tale ruolo viene svolto da ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, in qualità di supporto tecnico al Comitato Ecolabel-Ecoaudit, l'organismo nazionale competente per il rilascio del marchio



Figura 19. Logo Blue Angel

dall'agenzia federale germanica per l'ambiente. I requisiti a cui è subordinato il rilascio del marchio sono:

1. presentazione di una domanda in lingua attestante la conformità ai requisiti indicati nella specifica applicabile,
2. fornitura di documentazione di prodotto e certificati di prova.

La documentazione di prodotto include i certificati dei prodotti utilizzati nel processo e la presentazione di certificati di prova annuali rilasciati da laboratori indipendenti riconosciuti dal RAL e accreditati ISO 17025. Questa certificazione valuta i dati in riferimento all'intero contesto europeo, e considera i dati quantitativi, mentre come aspetto negativo c'è l'impossibilità di confrontare più prodotti e il limitato uso della certificazione perché adottabile solo da esperti di LCA

Nordic Ecolabel, conosciuto anche come Swan label, è il marchio di certificazione ambientale scandinavo ufficiale. Valuta ogni fase del ciclo di vita di un prodotto ed ha lo scopo di fornire alle aziende un marchio di qualità per promuovere la propria politica ambientale ed agli utenti uno strumento per effettuare scelte consapevoli. Il Vantaggio di questo marchio è che si fonda su valutazioni derivanti da dati esclusivamente quantitativi, mentre lo svantaggio è non che consente di effettuare un confronto tra prodotti, non è adatto a utenti inesperti di LCA e considera i dati riferiti esclusivamente al contesto dei paesi nordici.



Figura 20. Logo Nordic Ecolabel

Natureplus, un marchio svizzero che certifica la qualità per prodotti da costruzione bio-ecologici, nasce per garantire ai prodotti certificati un'immagine di rispetto per la salute, di produzione sostenibile, di risparmio di risorse naturali non rinnovabili e di facilità di posa in opera infatti uno dei primi requisiti per etichettare il prodotto con questo marchio è che almeno l'85% delle materie prime impiegate nella sua composizione provenga da fonti rinnovabili e/o minerali; occorre inoltre che sia limitato l'uso di materiali sintetici e di sostanze tossiche o nocive per l'ambiente e la salute; come ultima condizione occorre che il prodotto sia accompagnato da una dichiarazione della sua composizione, che fornisce una migliore classificazione del prodotto stesso al consumatore. L'aspetto positivo di questo marchio è la valutazione quantitativa dei parametri, mentre le negatività dipendono dall'impossibilità di confrontare più prodotti tra loro, non considerare le prestazioni dei prodotti rispetto al requisito benessere, né i costi economici.



Figura 21. Logo Natureplus

38. è la prima Associazione nata in Italia nel 1989 nel settore della bioedilizia con l'obiettivo di sensibilizzare gli utenti della casa sui pericoli, per la salute dell'uomo e del territorio, insiti nell'attuale modello produttivo del settore edile e sulla necessità di modificarne radicalmente gli indirizzi, di favorire la diffusione dei metodi costruttivi e dei materiali che rispettano gli esseri viventi e il loro ambiente.

La certificazione **ANAB**, è un marchio Italiano promosso dall'Associazione Nazionale Architettura Biologica³⁸ ed ha come obiettivo quello di certificare dei prodotti. Le categorie merceologiche in cui è attualmente possibile reperire materiali e prodotti certificati ANAB per la bioedilizia sono: i laterizi termici; i laterizi per muratura/pavimentazione; i blocchi-cassero per solaio; gli isolanti termici/acustici; gli isolanti premiscelati; le malte/intonaci; le pietre ricostruite; i trattamenti per legno; i prodotti ceramici. I criteri della valutazione dei prodotti richiesti per la certificazione sono: la rispondenza funzionale all'impiego dichiarato, l'assenza di sostanze pericolose per l'uomo e per l'ambiente, l'impiego di materie prime facilmente rinnovabili e di materie seconde. La valutazione LCA del prodotto avviene definendone il profilo



Figura 22. Logo certificato ANAB

STRAW_WIND Ventilated roof
Sviluppo e sperimentazione di un sistema/componente
per coperture ventilate ecosostenibili
prodotte dalla conversione "by products" della paglia

ambientale, le criticità e le potenzialità del prodotto all'interno del ciclo di vita ed infine considerando i prodotti analoghi alternativi mediante strategie di benchmarking³⁹. L'aspetto negativo di questa certificazione è che vengono trascurati gli impatti delle tecnologie delle modalità di assemblaggio, e che i dati usati per certificare il prodotto non sono pubblicati. I criteri della valutazione dei prodotti richiesti per la certificazione sono: la rispondenza funzionale all'impiego dichiarato, l'assenza di sostanze pericolose per l'uomo e per l'ambiente, l'impiego di materie prime facilmente rinnovabili e di materie seconde.

Il marchio **FSC**, (Forest Stewardship Council) attesta la sostenibilità nella gestione delle foreste a livello internazionale, sancendo la provenienza dei prodotti da territori dove il patrimonio forestale è gestito in maniera corretta, sia da un punto di vista ambientale che sociale. La certificazione ha lo scopo di dimostrare la corretta gestione forestale individuandone la tracciabilità dei prodotti derivati.

In base alla percentuale di legno impiegato e al tipo di fonte si possono avere ulteriori specifiche dell'etichetta in : puro, misto o riciclato. La prima si ottiene quando la materia prima impiegata è al 100% proveniente da foreste gestite in maniera rispondente alle prescrizioni, la seconda quando si ha l'impiego di materia prima mista- in parte da di foreste gestite correttamente e in parte da materiale riciclato- la terza si ha quando il materiale che compone il prodotto è ottenuto esclusivamente da legno riciclato.

Il marchio **PEFC**, (Programme for the Endorsement of Forest Certification schemes) è gestito da un organismo di normazione basato sul rispetto degli indicatori messi a punto nel corso delle Conferenze Ministeriali per la protezione delle foreste in Europa di Helsinki (1993) e Lisbona (1998) e sulla certificazione da parte di un organismo



Figura 22. Logo FSC

39. In economia si intende una metodologia basata sul confronto sistematico che permette alle aziende che lo applicano di compararsi con le migliori e soprattutto di apprendere da queste per migliorare, le sue finalità sono quindi utili per operare delle dei processi di reingegnerizzazione aziendali oppure un miglioramento incrementale qualitativo.



Figura 24. Logo marchio PEFC

indipendente. La certificazione ha lo scopo di migliorare la filiera foresta–legno, consentendo di commercializzare legno e prodotti derivanti da foreste e boschi gestiti in modo sostenibile.

Le etichette di tipo II sono caratterizzate dall'autocertificazione da parte del produttore non subordinata al giudizio di un organismo indipendente; infatti è il produttore a selezionare e dichiarare le informazioni ambientali sul proprio prodotto (tra cui contenuto di materiale riciclato, il rilascio di VOC, ecc.), non ci sono delle soglie minime di accettabilità, sono comunque richieste metodologie di verifica e di prova su base scientifica, perciò queste etichette sono spesso generiche e quindi possono essere poco affidabili.

Ciclo di Mobius, Asserzione di riciclabilità, può contenere sia informazioni sulla riciclabilità del prodotto (quando c'è solo il simbolo) che informazioni sulla quantità di materiale riciclabile (se accompagnato da un valore percentuale all'interno del simbolo).



Figura 25. Logo ciclo di Mobius

Pannello Ecologico, sviluppato dal Consorzio Pannello Ecologico attesta che le caratteristiche del pannello usato nel settore dell'arredo e realizzato al 100% con legno riciclato, inoltre la versione del pannello denominata LEB (Lowest Emission Board) garantisce che siano rispettati i valori minimi assoluti di emissione di formaldeide, (inferiori a 0,1 ppm, limite normativa europea per definire il prodotto in classe E1). Oltre a questa versione del pannello c'è anche il marchio IDROLEB che, a differenza del precedente, è caratterizzato da una buona prestazione idrofuga e quindi è indicato per ambienti umidi quali bagni o cucine.



Figura 26. Logo pannello ecologico

ICMQ, Istituto di Certificazione e Marchio Qualità per prodotti e servizi per le costruzioni, la presenza del marchio assicura che tutta la produzione oggetto di certificazione sia conforme a quanto dichiarato dal produttore; si utilizza una scala di punteggi che permette di stabilire quattro livelli: ICMQ ECO, ECO Silver, ECO Gold ed ECO Platinum.

Il riconoscimento dell'appartenenza ad uno dei quattro livelli dipende dal fatto che il prodotto da certificare possieda una o più caratteristiche riconducibili alle tre dimensioni della sostenibilità:

- 1.tutela dell'ambiente
- 2.tutela delle risorse
- 3.risparmio energetico

Gli schemi di certificazione già attivi riguardano: l'acciaio per calcestruzzo armato, gli aggregati riciclati, il calcestruzzo, gli elementi in laterizio, i fibrorinforzati, gli intonaci, gli isolanti, le malte, i masselli e le lastre per pavimentazione, i massetti cementizi a base di solfato di calcio, le materie plastiche di riciclo e i pannelli prefabbricati.

Nella categoria delle etichette di tipo III la norma ISO14025:2010 si colloca l'EPD (Environmental Product Declaration). L'EPD, nota anche come dichiarazione ambientale di prodotto, è uno strumento che attesta in modo scientifico e rigoroso il comportamento del prodotto nei confronti dell'ambiente; è lo strumento per eccellenza con cui poter valutare la prestazione del prodotto in termini ambientali, che evidenzia gli impatti che il prodotto causa, durante una parte del suo ciclo di vita. Per quanto concerne le specifiche EPD dei prodotti edilizi occorre far riferimento alla ISO 21930:2007⁴⁰.



Figura 27. Livelli certificazione ICMQ



Figura 28. Logo EPD

40. Sustainability in building constructions -Environmental Declaration of Building Products. La norma fornisce un quadro di requisiti di base e per le categorie di prodotto edilizio in accordo alle disposizioni della UNI EN ISO 14025:2010 e della Standard ISO 15392:2008, Sustainability in building construction General principles; ovvero la norma che stabilisce i principi generali di sostenibilità nel settore delle costruzioni, basandosi sul concetto di sviluppo sostenibile in funzione dell'LCA dell'edificio, del processo o del prodotto.

STRAW_WIND Ventilated roof
Sviluppo e sperimentazione di un sistema/componete
per coperture ventilate ecosostenibili
prodotte dalla conversione "by products" della paglia

Le categorie d'impatto considerate dalle EPD sono:

- consumo di energia primaria;
- cambiamenti climatici;
- distruzione della fascia di ozono;
- acidificazione
- eutrofizzazione;
- produzione di ossidanti fotochimici;
- produzione di rifiuti

In pratica l'EPD si basa sui principi della metodologia

LCA, che fa sì che i valori siano ottenuti in modo oggettivo, quindi a differenza di quello che accade con le etichette di tipo I e II è possibile fare un confronto tra prodotti della stessa categoria. Altre tipologie di indicatori sintetici sono lo zaino ecologico, MIPS, MAIA e L'energia grigia.

1.3.2.3 Metodi basati su indicatori sintetici

Lo “**zaino**”**ecologico** è definito dalla l'AEA (European Environmental Agency) come l'input di materiali per la realizzazione di un prodotto meno il peso del prodotto; nello specifico il termine dell'input di materiale viene quantificato come la quantità di materiale naturale fisicamente "spostato" per ottenere un prodotto. In parole povere quando si usa lo zaino ecologico come fattore sintetico dobbiamo immaginare che il peso è espresso come un carico invisibile portato sulle spalle dall'ambiente. I componenti che caratterizzano il valore dello zaino ecologico sono:

1. Materiali abiotici: pietre, ghiaia, sabbia, minerali, combustibili fossili (carbone, petrolio, gas minerale).

2. Materiali biotici: biomassa vegetale e animale.
3. Terreno per produzioni agricole e forestali: quantità di terreno fertile perso per erosione.
4. Acqua: prelevata per usi industriali o agricoli
5. Aria: prelevata per trasformazioni fisiche (separazione dei suoi gas) o chimiche (reazione dei suoi gas, per esempio l'ossigeno per la combustione).

Mentre l'unità di misura può essere sia il rapporto tra i kg di natura e i kg di prodotto che quello tra i kg di natura e l'unità di prodotto.

Il **MIPS**, Material Intensity Per Service, indica la quantità totale di natura impiegata per realizzare un prodotto, espressa in chilogrammi, ed è la somma del peso del prodotto e del suo zaino ecologico. Secondo Schmidt-Bleek il MIPS dovrebbe diventare un'unità internazionale di valore ecologico, da affiancare al prezzo di ogni prodotto o - meglio ancora - di ogni servizio. Il MIPS indica il prezzo ambientale di un prodotto o un servizio attraverso i kg di natura che sono richiesti per realizzare un prodotto o un servizi.

Il **MAIA** - Material Intensity Analysis rappresenta un metodo per progettare prodotti e soprattutto servizi in modo da impiegare la più bassa intensità possibile di materiali per ogni unità di servizio desiderata. L'uso di questi indicatori sintetici risulta più utile se si valuta un servizio che un prodotto; ad esempio un apparecchio telefax con uno zaino ecologico di 300 kg/kg per poter bilanciare il servizio deve ridurre la corrispondenza tradizione di almeno 7 tonnellate. Analogamente considerando la carrozzeria di un'auto in alluminio e una in ferro si può riscontrare un minor consumo di carburante per l'auto in alluminio

perché è più leggera ma lo zaino ecologico dell'alluminio è molto superiore allo zaino del ferro delle attuali carrozzerie.

L'Emblodied Energy, nota anche come energia grigia, si ha quando ci riferiamo alla sommatoria di tutti gli input energetici impiegati nella fasi di vita del prodotto, dalla fase di estrazione a quella di dismissione. Per ovvie ragioni i materiali che presentano un valore di EE maggiore sono quelli sintetici di derivazione petrolchimica (Fig 29); il valore dell'EE non può essere definito

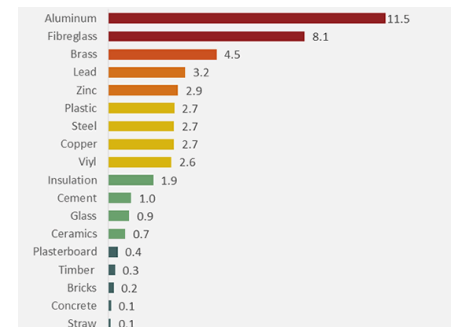


Figura 29. Embodied Carbon materiali da costruzione Fonte: Inventory of Carbon & Energy (ICE) database kg CO2/kg

come un termine assoluto, poiché i fattori di variazione che possono influenzare il valore sono molteplici. Alcune valutazioni considerano esclusivamente l'energia grigia dei materiali, altri non includono i costi di trasporto, altri ancora considerano solo in parte l'energia richiesta per l'estrazione delle materie prime; sebbene ci sia questa flessibilità sull'valore che esprime tale energia (spesso anche una maggiore o minore efficienza delle macchine usate per produrlo può modificare tale valore) l'aleatorietà di questo parametro può essere controllata applicando i valori di EE raccolti nel database Inventory of Carbon & Energy (ICE)⁴¹

L'EE è un valore che può essere calcolato non solo sul singolo prodotto ma anche quando si assicura un servizio oppure quando si intende valutare un sistema edilizio; a tal proposito possiamo distinguere in:

energia incorporata iniziale , ovvero l'energia non rinnovabile consumata per l'acquisizione delle materie prime, la loro trasformazione, la fabbricazione, il trasporto al sito e la costruzione; questo tipo di energia è ancora scomponibile in energia diretta e indiretta;

41. prodotto dall'Università inglese di Bath, raccoglie sia i valori di EE che di CO₂ emessa dei materiali da costruzione tradizionali ma anche che alternativi.

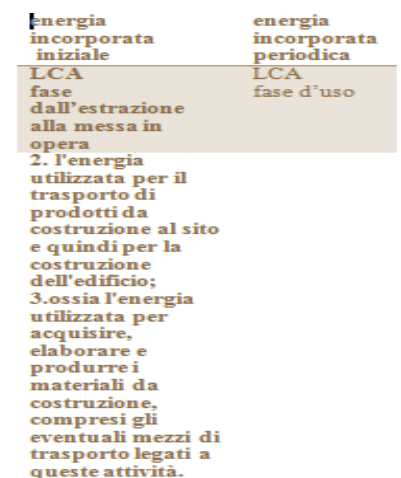


Figura 30. Energia diretta e indiretta

STRAW_WIND *Ventilated roof*
Sviluppo e sperimentazione di un sistema/componete
per coperture ventilate ecosostenibili
prodotte dalla conversione "by products" della paglia

energia incorporata periodica, è composta dall'energia spesa per mantenere, riparare, sostituire i materiali e i componenti del sistema edilizio.

Oltre al parametro dell'energia incorporata altri indici utili per definire il profilo ecologico ed energetico del prodotto, sono:

- Energia Primaria - PEI -

Rappresenta l'energia primaria impiegata nelle fasi di produzione del materiale. L'indicatore è suddiviso in risorse energetiche non rinnovabili PEInr e rinnovabili PEIr, è espresso in MJ per unità di massa (kg).

- Effetto Serra - GWP-

Rappresenta il contributo di un materiale al riscaldamento globale rispetto a quello di una quantità equivalente di anidride carbonica CO₂ il cui GWP è pari a 1. Il valore GWP è espresso in kg CO₂ eq per unità di massa (kg).

- Acidificazione -AP-

Misura la tendenza di un materiale ad assumere un effetto acidificante ed è quantificato in rapporto al potenziale di acidificazione di un'unità in massa di anidride solforosa SO₂. Il valore AP è espresso in kg SO₂ eq per unità di massa (kg).

- Eutrofizzazione - EP-

La quantità potenziale di PO₄-3 emessa per unità di massa in rapporto a quella generata da un'unità in massa di fosfato il potenziale. Misura la tendenza di un materiale ad arricchire un ecosistema di sostanze nutritive (composti di azoto o fosforo), Il valore è espresso in kg PO₄-3 per unità di massa (kg).

- Smog Fotochimico

Racchiude un'ampia varietà di sostanze di interesse ambientale altamente inquinanti. (ozono, biossido di azoto e da alcuni composti organici reattivi); la loro diffusione è causa di danni sia sulla salute che sugli ecosistemi, nonché arreca danni ai materiali da costruzione. L'indice con cui viene espresso questo parametro è C2H4 eq per unità di massa (kg).

- Riduzione dello strato di ozono

Indica la tendenza di un materiale a favorire l'assottigliamento dello strato di ozono attraverso l'emissione di gas dannosi quali CFC e HFC durante il ciclo di vita. L'indice relativo viene espresso in kg CFC-11 eq per unità di massa (kg).

1.3.3 Prodotti coibentanti ecosostenibili

In questo paragrafo verrà analizzata le caratteristiche dei prodotti isolanti naturali diffusi nel mercato italiano.

Secondo i dati dell'ANIT -Associazione Nazionale Isolanti Termici ed Acustici- la lana di legno e la fibra di legno sono i prodotti più utilizzati nel contesto edilizio nazionale, infatti, occupa rispettivamente il 46,6% e il 33,3%; in sostanza circa l'80% della quota di mercato è interessato da questa tipologia di prodotto; sicuramente una delle ragioni dell'ampia diffusione delle fibre di legno è la maggior "storicità" dei prodotti di questo tipo. Il sughero a differenza delle fibre vegetali si ottiene presenta una struttura cellulare e non fibrosa quindi risente meno dei problemi di igroscopicità che possono invece riguardare le fibre, le fibre vegetali sono più igroscopiche del sughero e quindi richiedono alcuni accorgimenti in funzione della messa in opera del prodotto.

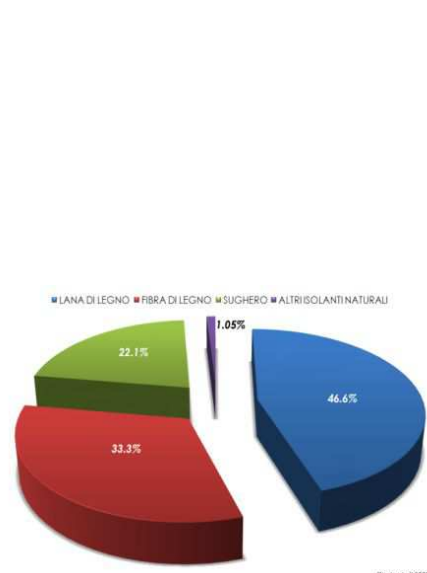


Figura 31. Distribuzione isolanti in fibre naturali nel mercato italiano.

In base all'origine i materiali isolanti possono essere distinti in: vegetali, animali e minerali (Tab.7). Restringendo il campo d'indagine alle sole fibre vegetali è importante ricordare che il diverso ecoprofilo del prodotto finale dipende in primis dal processo di estrazione della fibra. Le operazioni di estrazione delle fibre possono avvenire mediante azioni chimiche o meccaniche, in linea generale si possono ricondurre le operazioni di estrazioni a quattro differenti parti della fibra vegetale, si possono avere le estrazioni da stelo, frutto, foglia e seme (Tab 8).

Per le fasi di estrazione da stelo le principali fasi di lavorazione successive alla raccolta sono:

- macerazione della fibra (tale operazione può avvenire in acqua oppure all'aria e in alcuni casi anche mediante solventi chimici);
- essiccazione della fibra ;
- cardatura⁴²;
- pettinatura⁴³;

L'estrazione da frutto, si ottiene principalmente dalla fibra dal frutto del cocco, la componente fibrosa si ricava separando il frutto dal mesocarpo; la consistenza della fibra è molto simile a quella del legno per cui non occorre procedere con le operazioni di macerazione in acqua, mentre la fase successiva è l'estrazione e la tessitura della fibra che viene effettuata con apposite macchine; il procedimento di estrazione è quindi di tipo meccanico, in merito a questo tipo di fibra si può affermare che la scarsa disponibilità della materia prima sul nostro territorio fa aumentare il valore di impatto del prodotto finale, in quanto i costi energetici richiesti per il trasporto della materia prima possono compromettere la considerazione finale dell'LCA del prodotto.

STRAW_WIND *Ventilated roof*
Sviluppo e sperimentazione di un sistema/componente
per coperture ventilate ecosostenibili
prodotte dalla conversione "by products" della paglia

Vegetale	Fibrosa	Legno mineral. Legno Canna palustre Juta Cocco Mais Lino Kenaf Cellulosa Canapa Paglia
	Cellulare	Sughero
Animale	Fibrosa	Lana di pecora
Minerale	Cellulare	Pomice Argilla esp Vermi.esp Vetro granulare espanso
	Fibrosa	Vetro Roccia

Tabella 7. Origine isolanti naturali

Seme	Foglia	Stelo	Frutto
Cotone Palma	Abaca Agave Ananas Banana Palma Piassava Rafia	Alfa Bamboo Canapa Ginestra Lino Kenaf Juta Ortica Panico Raime	Cocco Luffa Taiman do

Tabella 8. Fibre vegetali e fonte estrattiva

42. La cardatura è la prima operazione che viene effettuata sulla fibra per liberarla dalle impurità, ha lo scopo di districare e rendere parallele le fibre tessili, al fine di permettere le successive operazioni di filatura.

43. La pettinatura è la prima operazione che viene effettuata sulla fibra per liberarla dalle impurità, ha lo scopo di districare e rendere parallele le fibre tessili, al fine di permettere le successive operazioni di filatura.

L' estrazione dalla foglia invece non avviene estraendo la fibra da ogni singolo elemento della pianta come avviene per l' estrazione da stelo, in questo caso i filamenti sono ottenuti dalla foglia che dopo la macerazione in soluzioni acquose con poco concentrate di vari sali minerali e la successivamente essiccazione nonché raschiatura meccanica della foglia rilasciano la componente filamentosa della fibra



Figura 32. Estrazione fibre vegetale da foglia di agave Fonte: ing. Carlo Santulli, Università di Roma – La Sapienza, Dipartimento di Ingegneria Elettrica

Fibre estratte da semi: Si trovano nella forma di peluria prodotta dalla superficie dei semi della pianta. Vengono ricavate con una semplice sfregatura dei semi stessi, per questo motivo sono caratterizzate dall'essere disponibili nella loro purezza originaria, senza l'intervento di trattamenti chimici che ne intaccano l'integrità strutturale chimico-fisica. Una tipica fibra da seme è il cotone. Si riporta qui di seguito un confronto delle prestazioni meccaniche delle diverse fibre che vengono studiate soprattutto per la progettazione dei materiali fibro-rinforzati.

Fiber	Density (g/cm ³)	Elongation at break (%)	Fracture stress (MPa)	Young modulus (GPa)
Cotton	1.5	7.0–8.0	287–597	5.5–12.6
Jute	1.3–1.46	1.5–1.8	393–800	10–30
Flax	1.4–1.5	2.7–3.2	345–1500	10–80
Hemp	1.48	1.6	270–900	20–70
Sisal	1.2–1.5	2.0–2.5	511–700	3.0–98
Bamboo	0.8	/	391–1000	48–89
Soft wood	1.5	/	1000,0	40,0
Ramie	1.5	3.6–3.8	400–938	44–128

Tabella 9. Confronto prestazioni meccaniche di alcune fibre vegetali
fonte : Natural fiber eco-composites. Polymer composites [4]

Tra i fattori che possono determinare delle variazioni prestazionali del prodotto finito, incidono sicuramente le condizioni di crescita della pianta, il clima e l'età della pianta sono degli agenti che influenzano in modo decisivo la prestazione della fibra. Allo stato attuale la ricerca scientifica è fortemente impegnata nello studio e verifica della compatibilità tra matrici e fibre vegetali al fine di ottenere materiali compositi dalle altre prestazioni meccaniche ad esempio è stato proposto il prodotto ibrido canapa/alluminio (Fig.33); altri studi si concentrano sulle proprietà dei laminati rinforzati con cellulosa o lino con ottenuti hanno mostrato proprietà a flessione comparabili con le prestazioni dei compositi tradizionali in fibra di vetro e che quindi è auspicabile una sostituzione di prodotto in nome di una maggiore sostenibilità di prodotto (Fig.34). Un esempio di prodotto composito sostenibile è l'ARBOFORM il prodotto si ottiene con una miscela di polveri pressate a caldo da lignina, scarti di legno ed additivi naturali, ha il vantaggio di poter essere lavorato come i prodotti termoplastici, inoltre presenta proprietà superiori rispetto ai laminati in legno risulta sia in merito alle prestazioni meccanicamente che alla resistenza al fuoco. Tornando nuovamente alle fibre vegetali utilizzate in edilizia è bene ricordare che il maggior utilizzo della fibra è l'impiego come materiale isolante, quindi le principali proprietà da verificare sono:

la CONDUTTIVITA' TERMICA cioè il flusso di calore Q (misurato in J/s ovvero W) che attraversa una superficie unitaria A di spessore unitario d sottoposta ad un gradiente termico ΔT di un grado Kelvin (o Celsius). I materiali con elevata conducibilità termica sono detti conduttori (termici) mentre quelli a bassa conducibilità termica sono

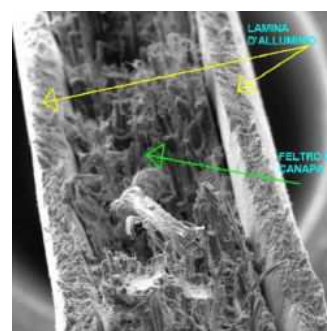


Figura 33. Pannello sandwich ibrido canapa/ alluminio
fonte Santulli

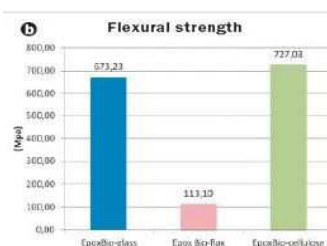


Figura 34. Confronto delle proprietà a flessione dei laminati compositi con resina biobased e fibra di vetro, lino e cellulosa.

<http://www.compositimagazine.it/panelli-in-composito-con-resina-bio-based/>

definiti isolanti (termici). La conducibilità termica ha un ruolo fondamentale nella progettazione di case a basso consumo energetico: materiali a bassa conducibilità termica garantiscono un elevato isolamento termico dell'edificio, permettono un basso consumo di energia per mantenere la temperatura interna.

La RESISTENZA AL PASSAGGIO DEL VAPORE rappresenta la capacità di un materiale di resistere al passaggio di vapore acqueo rispetto ad un equivalente spessore di aria, si indica con il fattore μ che più è basso più esprime la permeabilità al vapore, ovvero rende il materiale traspirante.

Lo SFASAMENTO cioè la differenza di tempo che intercorre tra l'ora in cui si ha la massima temperatura all'esterno e l'ora in cui si ha la massima temperatura all'interno, e non deve essere inferiore alle 8/12 ore. Lo sfasamento (ϕ) è l'arco di tempo (ore) che serve all'onda termica per fluire dall'esterno all'interno attraverso un materiale edile. Maggiore è lo sfasamento, più lungo sarà il tempo di passaggio del calore all'interno dell'edificio.

La CAPACITÀ TERMICA indica il valore della quantità calorica in Joule, che 1 kg di materia assorbe o emana, quando la sua temperatura viene alzata o abbassata di un K (Kelvin). Per alcuni materiali edili sono indicati i valori della capacità termica specifica in base alla norma DIN EN 12524, oppure sono indicati i valori verificati dal produttore. Più grande è la capacità termica massica, maggiore è la capacità di un materiale edile (per kg) di accumulare energia termica.

La MASSA VOLUMICA - DENSITÀ' è il peso in una unità di volume di un materiale. D'estate sono preferibili alti valori di massa volumica a parità di spessore e conducibilità termica. Aumentando la densità diminuisce la diffusività.

I fattori che determinano la scelta non possono essere rilegati esclusivamente alle proprietà tecniche; anche nella scelta delle fibre naturali il fattore discriminante può la valutazione ambientale del prodotto finito. Nella tabella 8 si propone un confronto tra isolanti vegetali con l'intento di confrontare anche gli impatti ambientali delle diverse fibre vegetali.

	Canapa	Cellulosa (pannello)	Cellulosa (fiocchi)	Fibra di cocco	Fibra legno extra porosa	Fibra legno porosa	Sughero (granulare)	Sughero (pannello)	Fibra di lino con poliestere
Conducibilità termica (W/mK)	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,005-0,0055	0,42	0,42	0,04
Densità (Kg/m³)	30-85	50	35-55	90	160	250-270	100	120	30
Diffusione al vapore	1-5	2	2	1	5	5	3	18	1
Calore specifico (J/KgK)	2000	1900	1900	2000	2000	2000	1800	1670	1550
GWP 100 (Kg di CO ₂ eq.* Kg)	-0,0141	-0,2376	-0,794	0,4932	-0,5171	-0,1486	-1,1956	-1,1956	0,5094
AP (Kg di SO ₂ eq.* Kg)	0,0048	0,0052	0,003	0,027	0,0092	0,0113	0,002	0,002	0,067
PEI (MJ/Kg)	31,8534	19,3642	7,6164	33,5615	0,0005	0,0004	7,5127	7,5127	39,0361

[5] Mazzucchelli E. S. (2013) Edifici ad energia quasi zero- Materiali, tecnologie e strategie progettuali per involucri e impianti innovativi ad alte prestazioni- Maggioli Editore, Rimini

[6] Sasso U. ISOLANTI SI, ISOLANTI NO, secondo BIOARCHITETTURA – Alinea Editrice 2003

Tabella 10. Confronto materiali tra fibre vegetali isolanti e relativi impatti ambientali delle stesse (Rielaborazione dell'autore fonte [5])

Ulteriori approfondimenti sugli impatti ambientali sono stati condotti consultando il testo di Sasso, U [6]; le finalità dello studio sono state orientate verso la comprensione degli impatti ambientali in funzione dei processi produttivi del prodotto finito, dal confronto tra sughero, fibra di legno e paglia si evince che l'indice PEI della paglia è notevolmente inferiore, questo perché allo stato attuale la paglia viene impiegata "tal quale" senza subire processi di trasformazione, sarebbe infatti opportuno analizzare LCA (Fig.33). In conclusione del paragrafo sulla base della consultazione delle schede tecniche di prodotto e delle informazioni desunte da alcuni riferimenti bibliografici (Fassi, A., & Maina [6] Patti,

STRAW_WIND *Ventilated roof*
Sviluppo e sperimentazione di un sistema/componete
per coperture ventilate ecosostenibili
prodotte dalla conversione "by products" della paglia

F. [7]) è stata prodotta una schematizzazione qualitativa dei prodotti isolanti; considerazioni quattro aspetti legati al ciclo di vita dalla culla al cancello, e cioè:

- la disponibilità della materia prima;
- l'energia richiesta per produrre il prodotto;
- i valori di inquinamento rilasciati nella fase produttiva
- riciclabilità.

Poiché i dati consultati spesso non sono stati non omogeneo è stata redatta dall'autore la seguente classificazione

STRUTTURA	MATERIALE ISOLANTE	DISPONIBILITÀ MATERIE PRIME	FABBISOGNO ENERGIA FASE PRODUZIONE	INQUINAMENTO AMBIENTALE FASE PRODUZIONE	RICICLABILITÀ
Fibrosa	Legno mineralizzato	P	M	M	RM
	Legno	R/A	B	B	RM
	Canna palustre	R	B		RI, I /C
	Juta	B/R	B	B	RI, I /C
	Cocco	R/A	B		RM
	Mais	R/A	B		RM
	Lino	R/A	B		RM
	Kenaf	R/A	B	B	RM
	Cellulosa	P/R	B	B	RM
	Canapa	R/A	B	B	RM
Cellulare	Sughero	R/L	M	B	RI*
Fibrosa	Lana di pecora	R	B	B	RI
Fibrosa	Vetro	NR/A	E	E	RI
	Roccia	NR/A	E	E	RI
Cellulare	Pomice	R	B		RU
	Argilla espansa	NR/A	M	M	RI
	Vermiculite espansa	NR/A	M	M	RI
	Vetro granulare espanso	NR/A	M	M	RU
	Calce-cemento cellulare	NR/A	M	M	RU
	Perlite espansa	NR/A	M	M	Ri
	Vetro cellulare	NR/A	E	M	RI*

Produzione Pre – Fine vita
 Produzion
 e
 B= bassa R=rinnovabile RM=rimontabile
 M= media NR= non RI= riusabile
 E= elevata rinnovabile RI*=Riusabile
 A=abbondante se montato
 L= limitata; a secco
 I= inceneribile
 C= combustibile

[6] Fassi, A., & Maina, L. (2006).
 L'isolamento ecoefficiente. Milano.
 Edizioni ambiente.

[7] Patti, F. (2012) .Isolanti termici
 per l'edificio : aspetti tecnico
 normativi, caratteristiche
 prestazionali, sostenibilità.
 Maggioli Editore ,

Tabella 11. Confronto materiali impatti prodotti isolanti Rielaborazione dell'autore da Fassi A., & Maina L. [6]

STRAW_WIND *Ventilated roof*
 Sviluppo e sperimentazione di un sistema/componete
 per coperture ventilate ecosostenibili
 prodotte dalla conversione "by products" della paglia

2. MATERIALI A BASSO IMPATTO AMBIENTALE:

LA PAGLIA

2.1 Morfologia, Produzione

La paglia è un sottoprodotto di varie coltivazioni, che si può ottenere sia dalle colture cerealicole impiegate nel campo agroalimentare (grano, orzo, riso, segale) che dalle colture dedicate quali canapa, lino, sisal, ecc. Sebbene il fronte delle colture dedicate⁴⁴ e no food⁴⁵ stia diventando sempre più argomento di valutazioni economico/estimative con l'obiettivo della valorizzazione e della produttività economica del suolo agricolo, e soprattutto dell'uso efficiente di tali prodotti per fini energetici; in questa sede si è deciso di indagare il valore potenziale della conversione per fini edilizi di materie prime residuali provenienti dalla coltivazione alimentare del frumento.

Secondo i dati della FAO⁴⁶ la produzione mondiale di cereali nel 2014 è stata di 2.542 milioni di tonnellate (Fig.35); pertanto le potenzialità offerte dalla gestione del sottoprodotto paglia possono essere notevoli. In seguito verrà trattato uno studio condotto dall'Università di Firenze⁴⁷ sull'uso alternato della paglia disponibile nel territorio toscano.



Figura 35. Produzione mondiali di cereali 2013

fonte: <http://faostat3.fao.org/browse/Q/QC/E>

STRAW_WIND *Ventilated roof*

Sviluppo e sperimentazione di un sistema/componete

per coperture ventilate ecosostenibili

prodotte dalla conversione "by products" della paglia

44. Sono coltivazioni impegnate principalmente per la produzione di biocombustibile (solido, liquido e gassoso). Le ricerche agronomiche mirano alla valutazione ed all'ottimizzazione delle potenzialità energetiche sia delle specie arboree che erbacee, tra le principali colture erbacee annuali si possono ricordare il mais e il sorgo. Per le colture erbacee poliennali si individuano le specie colturali con un favorevole bilancio energetico, caratterizzate cioè da alta efficienza fotosintetica e basse pretese in termini di pratiche agronomiche, cioè lavorazioni del terreno, concimazioni ed irrigazioni, tra queste si ricordano la canapa e canna comune. Altre potenzialità sono le piante infestanti quali il cardo, la ginestra, la robinia.

45. Il concetto delle coltivazione no-food si diffonde a partire dagli anni Novanta si fonda sul concetto di avere una produzione agricola non destinata a usi alimentari, anzi, l'intento è quello di impiegare il suolo agricolo per produrre delle materie prime ma impiegare per usi industriali e quindi come alternativa come alternativa ecologica ai prodotti di origine petrolchimica.

46. L'acronimo indica l'Organizzazione delle Nazioni Unite per l'alimentazione e l'agricoltura, cioè l'agenzia specializzata delle Nazioni Unite che ha lo scopo di contribuire ad accrescere i livelli di nutrizione, aumentare la produttività agricola, migliorare la vita delle popolazioni rurali e contribuire alla crescita economica mondiale.

<http://www.fao.org/3/a-14773E.pdf>

Le fonti bibliografiche inerenti la valorizzazione di questo "scarto" nei diversi settori e più propriamente in quello edilizio evidenziano come questa tematica trovi una collocazione ben definita nella disciplina della Tecnologia dell'Architettura, sia in termini di recupero edilizio, attraverso la valorizzazione della tradizionale tecnica costruttiva in balle di paglia, sia in termini di tecnologia applicata alle innovazioni di prodotto e processo; infatti l'industrializzazione del processo edilizio e la progettazione di componenti prefabbricati sta consentendo un ampliamento del campo di azione di questo materiale edile cosiddetto "povero".

Allo stato attuale si possono schematizzare i principali usi della paglia secondo questi valori percentuali:

- il 50% della produzione rimane sul campo, (viene interrata o bruciata per migliorare la fertilità del terreno);
- il 6% viene assorbito dall'industria cartiera per la produzione di carta paglia e cellulosa;
- il 35% viene utilizzato per fini zootecnici, come lettiera o come componente di diete alimentari;
- il 9% è destinato alla pacciamatura e all'industria micologica⁴⁸.

Dal punto di vista della produzione, a livello mondiale l'Asia rappresenta il più grande produttore di colture cerealicole, tanto che secondo la FAO, la Cina è classificabile come il primo produttore di grano. Non a caso molte delle fonti bibliografiche consultate evidenziano come gli studi sulla fattibilità tecnico-economica siano adottabili nella sostituzione della paglia nei processi di fabbricazioni dei pannelli OSB in legno.

A livello europeo, il Regno Unito è la nazione più impegnata nella ricerca e nella sperimentazione della paglia in edilizia; dalla collaborazione tra il Dipartimento di Architettura e ingegneria civile e

47. Spugnoli, P. (2013). STUDIO DI FILIERE AGRICOLE SOSTENIBILI PER LA PRODUZIONE DI BALLE DI PAGLIA DA COSTRUZIONE - RISULTATI PRELIMINARI. L'edilizia rurale tra sviluppo tecnologico e tutela del territorio, 239

48. <http://alimenti.vet.unibo.it/cap.aspx?id=F-08>

L'azienda Modcell sono stati ottenuti i noti pannelli prefabbricati in paglia (Fig 36). In ambito nazionale, la maggiore disponibilità di colture cerealicole e quindi del relativo “sottoprodotto- paglia” interessa principalmente quattro Regioni: l'Emilia Romagna e la Lombardia sono le regioni capofila per la produzione di grano tenero, mentre la Puglia e Sicilia sono le regioni capofila per la produzione di grano duro (Fig.37). L'acquisizione di tali dati è stato il punto di partenza della ricerca dottorale; l'indagine sulla diffusione di prodotti commerciali in paglia ha evidenziato che la regione più innovativa è la Puglia. Nel contesto territoriale pugliese sia i progetti imprenditoriali di natura privata che quelli pubblici attivati dalle start-up sulla innovazione, hanno permesso di progettare e realizzare due prodotti edilizi “Made in Italy”; il prodotto p@glia s.c.a.r., soddisfa l'esigenza dei prodotti coibentante eco-orientato e a ridotto impatto ambientale (Fig.38), mentre il prodotto PresPaglia, è costituito da un pannello modulare in calce e paglia destinato sia nelle chiusure verticali che nelle partizioni interne (Fig. 39). La grande disponibilità di materia prima sta inoltre spingendo l'azienda un' olandese Ecoboard Europe B.V.(maggiore produttrice europea di pannelli in agro-fibre) ad investire sul territorio, infatti, sono in atto delle valutazioni economiche sulla prospettiva futura di localizzare uno stabilimento produttivo dei pannelli eco- boards (Fig.40) in provincia di Foggia.

Dai dati sulla disponibilità di biomassa da paglia di cereali prodotti nell'ambito del piano PEAR della regione Puglia (Fig.40), si può osservare che la provincia di Foggia è quella più interessata dalla produzione di paglia, pertanto nell'ambito della valorizzazione delle risorse locali e soprattutto lo sviluppo di filiere produttive a “Km Zero”, si può avvalorare la proposta dell'azienda Ecoboard Europe B.V .

STRAW_WIND *Ventilated roof*
Sviluppo e sperimentazione di un sistema/componete
per coperture ventilate ecosostenibili
prodotte dalla conversione “by products” della paglia



Figura 36. Pannello modulare in paglia Mod Cell



Figura 37. Distribuzione colture cerealicole in Italia . Fonte: <http://censimentoagricoltura.istat.it/explorer/index.html#story>



Figura 38. pannello isolante in paglia
Fonte : p@glia s.c.a.r.



Figura 39. Biopannello PresPaglia



Figura 40. Pannello eco-boards

Mediante l'approccio bioregionalista, è auspicabile l'incentivo di uno scenario produttivo efficiente per l'intera area del mezzogiorno.

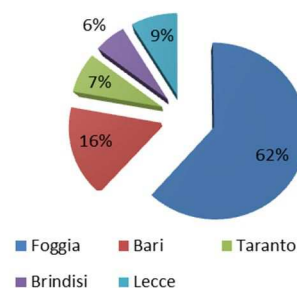


Figura 40. Disponibilità di biomassa da paglia di cereali della regione puglia. Fonte: Piano PEAR regione Puglia

2.2 Materiale tradizionale da costruzione

2.2.1 L'evoluzione delle tecniche costruttive delle case in paglia

Sebbene, siamo soliti pensare che l'uso della paglia in ambito edilizio sia una prerogativa delle popolazioni in via di sviluppo è importante ricordare che anche in Italia in passato tale materiale rappresentava una risorsa locale ben spesa. Infatti, trovo attinente presentare alcuni esempi di architetture vernacolari presenti sul nostro territorio. Nell'area Lagunare veneta e più precisamente nelle località di Bibione e Caorle, la costruzione dei Casoni, usate dai pescatori, rappresentano una memoria storica delle primitive costruzioni "a capanna" che impiegavano paglia e canne come materia prima per le costruzioni (Fig. 41). Oltre, a questa tipologia costruttiva, successivamente alla diffusione dei casoni di laguna, seguirono i Casoni di campagna. In questa costruzione l'impiego dei materiali locali venne destinato principalmente all'elemento di copertura (Fig.42). Sulla scia dell'indagine concernente l'uso della paglia come materiale edilizio degne di nota sono anche le coperture in paglia di frumento del Val Vestino (Fig.43) quelle in segale della Val Gesso (Fig.44). Dal punto di vista cronologico, la diffusione della paglia come materiale edilizio si fa coincidere con la diffusione dell'innovazione tecnologica della macchina per imballare le balle di paglia. I primi esempi di costruzione in paglia furono realizzate nello stato del



Figura 41. Casoni di Laguna Caorle.



Figura 42. Casoni di Campagna Azergrande (Pd).



Figura 43 . Val Vestino (Brescia) tetto paglia di frumento



Figura 44. Valle Gesso (Cuneo) tetto in paglia di segale

STRAW_WIND *Ventilated roof*
Sviluppo e sperimentazione di un sistema/componete
per coperture ventilate ecosostenibili
prodotte dalla conversione "by products" della paglia

Nebraska, impiegando le balle in modo massivo come chiusure verticali delle unità abitative dei pionieri americani che occupavano tali territori. Proprio in onore dello stato che per primo si è fatto promotore delle costruzioni con le balle di paglia, la tecnica costruttiva è stata ribattezzata stile Nebraska. Il principio basilare della costruzione in stile Nebraska è quello di trattare le balle di paglia come se fossero degli enormi mattoni (Fig.45); nonostante la paglia svolga una funzione strutturale, la massima altezza consentita con questa tecnologia costruttiva è di un solo livello abitativo. Il tetto è messo in opera semplicemente appoggiandolo sulle pareti di chiusura, per tale ragione il carico viene assorbito integralmente dalla struttura verticale (Fig.46). A questo primordiale modo di costruire è seguito lo stile Post and Beam (Fig.47), che differisce dalla prima tecnica costruttiva per l'impiego delle balle di paglia non come materiale strutturale ma solo come elemento di chiusura dell'involucro edilizio; infatti, l'efficienza rispetto alle condizioni di coibenza ne ha avvalorato l'utilizzo come materiale edile. Poiché una buona costruzione ecologica non deve soddisfare solo le classi di esigenza del benessere e della salvaguardia ambientale, sono state apportate alcune delle migliorie alla staticità della costruzione predisponendo una struttura intelaiata in legno o acciaio (che potesse quindi garantire anche la costruzione di più livelli abitativi). Ulteriore passo verso la diffusione di strutture in paglia affidabili e sicure è stato compiuto con la tecnica costruttiva GREB (Fig 48). Tale tecnologia costruttiva è l'unica consentita dalla normativa la normativa italiana. Le costruzioni che seguono i dettami della tecnica GREB prevedono un sistema portante in legno, composto da una fitta intelaiatura in cui vengono infilate in un secondo momento le balle, secondo orientamento verticale. Questa metodologia

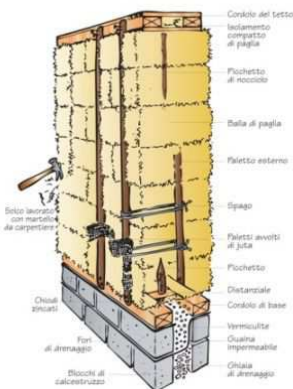


Figura 45. Messa in opera balle di paglia secondo il metodo Nebraska



Figura 46. Posa in opera copertura il metodo Nebraska



Figura 47. Tecnologia costruttiva post and Bream



Figura 48. Tecnologia costruttiva metodo GREB

STRAW_WIND *Ventilated roof*
Sviluppo e sperimentazione di un sistema/componete
per coperture ventilate ecosostenibili
prodotte dalla conversione "by products" della paglia

realizzativa è più articolata delle precedenti: la parete verticale viene realizzata impiegando un grande quantitativo di calce gettato in opera man mano che si solleva la parete. Dopo aver disarmato la struttura si passa al completamento degli elementi di finitura, mettendo in opera la rete porta intonaco e lo strato di intonaco. Tra i riferimenti iconografici della tecnologia delle case in paglia si possono riportare numerosi casi, anche perché molte delle costruzioni realizzate 150 anni fa sono ancora preesistenti. Dai dati presenti in letteratura, la prima costruzione con balle portanti risalente al 1886 è una scuola a Bayard, Scott's Bluff Country; a questa fecero seguito numerose costruzioni sia pubbliche (Fig. 49) che private. La Maison Feulette è il primo esempio di costruzione a due piani realizzato con paglia e legno in Europa. L'edificio realizzato a Montargis in Francia mostra l'impiego di elementi verticali in legno posti per supportare i carichi statici della struttura (Fig 50).

Gli esempi contemporanei di case in paglia portano con sé una nuova innovazione tecnologica; la prefabbricazione dei prodotti in paglia consente di riproporre tale tecnologia costruttiva superando i limiti normativi (molto spesso un'assenza di normativa tecnica specifica ne limita la diffusione) mediante la progettazione di prodotti finiti conformi alle certificazioni di prodotto a marcatura CE. La progettazione e la sperimentazione avviata in Europa⁴⁹ grazie alla diffusione dei prodotti prefabbricati ha permesso di proporre la costruzione di un intero quartiere residenziale progetto, il LILAC -Low Impact Living Affordable Community, che rappresenta un buon esempio di progettazione sostenibile eco-orientata che impiega la paglia come materia prima (Fig. 51).



Figura 49. Pilgrim Holiness Church 1928. fonte: http://www.wikiwand.com/en/Pilgrim_Holiness_Church (Arthur, Nebraska)



Figura 50. Maison Feulette, Montargis, Francia 1920

49. LILAC (Low Impact Living Affordable Community), progetto di cohousing (20 appartamenti e spazi comuni sia interni che esterni per i residenti) realizzato nel 2013 a Leeds, nel Regno Unito.



Figura 51. Progetto di cohousing. a Leeds (UK) 2013

STRAW_WIND *Ventilated roof*
Sviluppo e sperimentazione di un sistema/componente
per coperture ventilate ecosostenibili
prodotte dalla conversione "by products" della paglia

Il processo di prefabbricazione dei componenti edilizi si colloca nell'ambito delle tecniche di industrializzazione⁶ dell'edilizia; con tale termine si intende la gestione del cantiere che predispongono una sinergia tra il processo progettuale e quello costruttivo. L'uso delle tecniche e delle tecnologie avanzate deve servire per massimizzare la produzione, valorizzare la serialità del prodotto e quindi ridurre la spesa economica e la sicurezza delle attività di cantiere. Secondo questa concezione, il cantiere diventa un luogo di assemblaggio, con prodotti finiti con specifiche caratteristiche di qualità.

2.2.2 Prodotti e sistemi prefabbricati in paglia

Allo stato attuale dalla rassegna sulle classi merceologiche, è possibile definire tre categorie di prodotto finito in paglia; le dette categorie si articolano in prodotti strutturali e non, prodotti isolanti e prodotti di finitura. Nella prima categoria vengono raggruppati tutti quegli elementi modulari che mediante posa in opera a secco costituiscono l'involucro edilizio; alcuni esempi di prodotti strutturali modulari sono i pannelli dell'azienda inglese ModCell e i pannelli Ecococon prodotti in Lituania; la peculiarità di entrambi i prodotti è definita dalla funzione strutturale del prodotto finito; infatti, tali pannelli non richiedono l'ausilio di una struttura portante a telaio. Dal punto di vista commerciale i succitati prodotti possono essere assimilati ai pannelli strutturali in X-lam⁷; ovviamente, la natura stessa dei materiali impiegati evidenzia un differente impatto ambientale da parte dei pannelli in paglia e di quelli in X-lam. I Pannelli Modcell sono composti da un telaio in legno, che funge da cornice per la paglia compressa, e balle di paglia che sono inserite tal quale nel telaio.

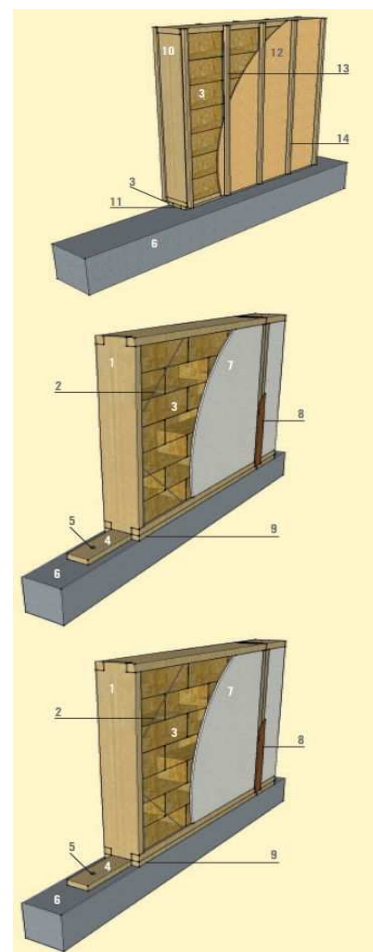


Figura 52. Pannelli ModCell
 1. telaio in legno; 2. acciaio di rinforzo
 3. isolamento in balle di paglia ;
 4. legno piatto di bas; 5. ancoraggio del
 dormiente; ; 6. piattaforma in c.a.
 7. rinzaffo di calce traspirante in 3
 strati; 8. dettaglio di chiusura in legno
 compensato; 9. doppia guida di base
 di base del telaio; 11. isolamento tra le guide
 di base del telaio; 12. pannellatura
 esterna traspirante; 13. montanti
 interni tra le balle di paglia ;
 14. listello in legno esterno pronto a
 ricevere la filatura finale; 15.
 rivestimento esterno traspirante, rete
 di rinforzo, mano di fondo e finitura
 di rivestimento

STRAW_WIND *Ventilated roof*
 Sviluppo e sperimentazione di un sistema/componete
 per coperture ventilate ecosostenibili
 prodotte dalla conversione "by products" della paglia

Dal punto di vista geometrico, il telaio può avere uno spessore variabile dai 40 ai 48 cm , mentre la lunghezza e l' altezza sono rispettivamente 300 e 320 cm. (Fig. 52); A seconda del tipo di prestazione energetica richiesta si possono avere tre tipi di pannello traditional, core, core+ (Tab 12); la principale peculiarità del prodotto si riconosce del fatto che esso è essere confezionato in centri di assemblaggio temporanei detti Flyng factory, posti a 20 km dal sito di costruzione;

	trasmissione	CO2 sequestrata	Resistenza al fuoco	Isolamento acustico (db)
traditional	0,18-0,19	1400	< 2	50
Core	0,13-0,14	1200	0,5-1	50
Core +	0,1-0,11	1300	0,5-1	52
Tabella 12. Prestazioni energetiche dei diversi tipi di pannello ModCell				

Per i prodotti Eco_Cocon , si presuppone un processo produttivo in stabilimento, quindi, nella valutazione del prodotto occorre tener presente la maggiore incidenza del costo di trasporto del prodotto fino al cantiere. Gli elementi modulati hanno dimensioni standard che dipendono dal tipo di applicazione, infatti, ci sono dei pezzi speciali in funzione dell'applicazione (architravi, colonne); in linea generale gli standard dimensionali variano: da 40 a 120 cm per la lunghezza, dai 30 ai 300 cm per l'altezza, mentre lo spessore è di 40 cm (Fig. 53). L'assemblaggio avviene anche in questo caso secondo modalità a secco; a seconda della geometria dell'edificio si segue uno specifico iter di assemblaggio, progettato preventivamente per definire la richiesta del numero e della tipologia di pannelli da impiegare nella costruzione (Fig.54). Nella categoria dei pannelli non strutturali

isolanti, trovano posto i pannelli Ekopanely. La vendita avviene anche in Italia, ma la sua produzione e ideazione è legata alla Repubblica Ceca. La fabbricazione del prodotto avviene in appositi stabilimenti e prevede la compressione della paglia e richiede uno strato di rivestimento in cartone riciclato (Fig 55). Le dimensioni standard variano da 80 a 120 cm per la lunghezza, da 120 a 320 per la larghezza e da 4 cm a 8 cm per lo spessore: ovviamente la messa in opera e l'assemblaggio del prodotto con materiali coibentanti garantisce una migliore prestazione termica dell'elemento tecnico. L'applicazione del prodotto prevede l'abbinamento dello stesso con un supporto strutturale in legno; infatti il pannello è autoportante ma non strutturale. Si può adottare tale prodotto sia nelle chiusure verticali sia in copertura, sia come parete divisoria degli spazi interni. Dalla stratigrafia di una parete esterna dello spessore di 38 cm, si osserva che l'impiego di 3 pannelli ekopanely da 6 cm, un'intercapedine e uno strato termoisolante (Fig 56) consentono di raggiungere un valore di trasmittanza termica pari a:

$$U = 0,179 \text{ W/m}^2 \text{ K},$$

mentre per una parete interna la trasmittanza termica che si può ottenere con uno spessore di 6 cm è $U = 1,264 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

Accanto a questi prodotti prefabbricati trovano spazio altre applicazioni di prodotto in paglia che si rifanno alla tradizione costruttiva dei mattoni in terra-paglia, infatti sono dei blocchi in paglia di riso e



Figura 53. Pannello prefabbricato Eco-Cocon

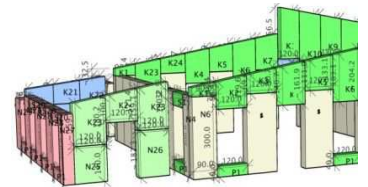


Figura 54. Schema di assemblaggio dei Pannelli prefabbricati Eco-Cocon



Figura 55. Pannello Ekopanel fonte: <http://www.ekopanely.it/>



Figura 56. pannello eKopanel fonte: <http://www.ekopanely.it/>

colla aventi le seguenti 30x30x60 cm (Fig. 57). L'assemblaggio è ottenuto mediante la posa in opera a secco, infatti i blocchi sono incastrati mediante sovrapposizione secondo la tipologia d'incastro dei blocchi lego, questo prodotto è studiato in California, e sono frutto della start-up Oryzatech, si deve predisporre su entrambe le facce del prodotto un rivestimento per tutelare la superficie.



Figura 57. Mattoni in paglia di riso

Osservando il mercato dei prodotti italiani prefabbricati in paglia si può ricordare il pannello prespaglia, che è un pannello modulare autoportante dalle forme geometriche definite:

- lunghezza 50 cm;
- spessore variabile da 10 a 30 cm ;
- altezza da 50 a 150 cm.



Figura 58. Pannello prespaglia

Il pannello è composto da paglia compressa, una rete zincata e uno strato di calce (Fig 59), si configura come un materiale riciclabile e biodegradabile, lo scenario di fine vita del prodotto prevede la disassemblabilità dei componenti. Il pannello può essere applicato sia nelle partizioni interne che nelle chiusure esterne, anche per questo prodotto è certificata la prestazione termica, in base allo spessore si riportano i seguenti valori:



Figura 59. Elemento modulare cappotto esterno
fonte:<http://padiglionepagliafalze>

- 0,781 W/m² K per lo spessore di 10 cm
- 0,418 W/m² K per lo spessore di 20 cm
- 0,285 W/m² K per lo spessore di 30 cm

Incluso nella categoria della prefabbricazione Made in Italy si può considerare il sistema modulare a cappotto realizzato dall'azienda Fanzè (Fig.61). In questo caso il pannello modulare presenta un telaio in legno che serve a contenere una balla di 36 cm; l'elemento di rifinitura dalla facciata esterna del pannello è costituito da uno strato di

calce di 3 cm. Questa soluzione è molto più rapida degli interventi a cappotto praticati secondo la tecnica tradizionale. Infatti, la modularità del sistema e gli incastri maschio femmina del telaio in legno agevolano la messa in opera del sistema.

2.2.3 Pannelli di finitura e di arredo

Nell'ambito dei prodotti usati per le rifiniture o il design è possibile ricordare i pannelli non strutturali Biofiber Wheat (Fig.60). Tali pannelli sono prodotti negli Stati Uniti e sono impiegati principalmente come pannelli decorativi o come partizioni interne; pur essendo prodotti che devono essere destinati esclusivamente all'uso interno, si sconsiglia di usarli negli ambienti molto umidi al fine di evitare il decadimento delle loro prestazioni meccaniche; dal punto di vista geometrico il pannello presenta una forma rettangola definita e degli spessori variabili, nello specifico l'elemento presenta le seguenti misure standard :

- 124,5 x 246,4 cm
- spessore 1,9 cm, 1,27 cm, 2,54 cm.

I pannelli Oriented Structural Straw Board rappresentano un'innovazione di prodotto rispetto ai pannelli OSB in legno, le cui prime sperimentazioni sono iniziate a metà degli anni '80, quando la questione energetica ha posto le prime riflessioni sul risparmio delle risorse e l'uso di materiali alternativi. Il pannello offre diverse tipologie di prodotto, il cui fattore di differenziazione è legato alla sua prestazione meccanica (Tabella 13).



Figura 60. Pannello Biofiber wheat

Fonte: http://growinggreenwest.com/GGW_products_environ.htm



Figura 61. Pannello OSB straw
Fonte: <http://www.novofibre.com/products/overview.php>

STRAW_WIND *Ventilated roof*
Sviluppo e sperimentazione di un sistema/componete
per coperture ventilate ecosostenibili
prodotte dalla conversione "by products" della paglia

Spessori in mm	≥5 ~ <8	≥8 ~ <15	≥15 ~ 22	USO
Pannello decorativo				
Modulo di elasticità (Mpa)		≥2500	≥2500	Apparecchi decorativi Serramenti Soffitti Decorazione d'interni Arredamento Wall decoration
Modulo rottura (Mpa)		≥20	≥20	
Pannello Base				
Modulo di elasticità (Mpa)	≥2400	≥2500	≥2600	Decorazione d'interni Arredamento Pavimentazione
Modulo rottura (Mpa)	≥20	≥20	≥18	
Pannello costruttivo				
Modulo di elasticità (Mpa)	≥2800	≥3500	≥3700	Decorazione d'interni Pavimentazione Edilizia e sistema abitativo Pareti divisorie Costruzione Soffitto Telai di finestre e porte
Modulo rottura (Mpa)	≥22	≥20	≥18	



Figura 62. Pannello OSB costruttivo. Fonte: <http://www.novofibre.com/products/overview.php>



Figura 63. Pannello OSB base. Fonte: <http://www.novofibre.com/products/overview.php>

2.2.4 Le caratteristiche delle balle usate in edilizia: aspetti e proprietà

Le premesse poste a supporto della valorizzazione e l'implementazione della paglia sono state avvalorate dalla rassegna sui prodotti commerciali e sulla storia della tecnologia costruttiva. Tuttavia, fino a questo momento non sono state trattate le specifiche caratteristiche della paglia in quanto materiale da costruzione.

Dai dati presenti in letteratura sulle prestazioni termoacustiche, sulla sicurezza e sulla sostenibilità del materiale emerge che i suoi punti di forza sono:

- notevoli valori di coibenza termica
- buona resistenza al fuoco
- buon isolamento acustico

STRAW_WIND Ventilated roof
Sviluppo e sperimentazione di un sistema/componete
per coperture ventilate ecosostenibili
prodotte dalla conversione "by products" della paglia

- ridotto impatto ambientale
- salubrità del prodotto.

La conducibilità termica della paglia è di circa a 0,054 W/mK; confrontando tale valore con quello di fibre naturali impiegate in edilizia si può osservare che i valori di λ delle fibre vegetali sono molto simili tra di loro; il range di oscillazione è da 0,035 a 0,06; tuttavia è importante ricordare che a parità di coefficiente di conducibilità termica occorre fare attenzione al costo energetico richiesto per produrre il materiale; infatti, per l'uso della paglia in edilizia è sufficiente raccogliere e comprimere la paglia in condizioni di umidità e densità ottimale, mentre per ottenere la fibra di lino o di canapa occorrono diverse fasi di lavorazione.

I fattori che possono influenzare la conducibilità termica della paglia sono principalmente due:

- la densità delle balle,
- l'orientamento delle fibre

Il valore di densità ottimale presente in letteratura si attesta nel range di 80-120 kg/m³; la densità è in stretta connessione geometrica con balle di paglia. Quando infatti si prevede l'uso della paglia "tal quale" occorre fare molta attenzione al tipo di balla che si decide di usare. Solitamente per una facilità di posa in opera si preferiscono le balle di piccole dimensioni, che spesso rappresentano un costo aggiunto per l'agricoltore in fase di raccolta; la restrizione sulla densità decade nel momento in cui la paglia è destinata alla filiera produttiva dei pannelli OSB oppure ad altri prodotti finiti. Il parametro della conducibilità termica cambia al variare dell'orientamento delle fibre di paglia rispetto al flusso di calore; infatti se il flusso attraversa la balla di paglia secondo lo stesso orientamento delle fibre la conducibilità

termica sarà maggiore, se invece le fibre sono disposte in modo perpendicolare rispetto al flusso, il valore della conducibilità sarà minore. In questo caso il valore più basso consente di avere la maggiore prestazione coibente; in letteratura ci sono stati numerosi studi che mostrano tramite dei test quale è l'orientamento migliore. Si riporta di seguito la sintesi delle ricerche sulla conducibilità termica prodotta da Carol Atkinson in *Energy Assessment of a Straw Bale Building*.

50. Lawrence, M., Heath, A. and Walker, P. (2009) The impact of external finishes on the weather resistance of straw bale walls. In: 11th International Conference on Non-conventional Materials and Technologies, NOCMAT 2009, 2009-09-06 - 2009-09-09, Bath http://opus.bath.ac.uk/16172/1/Paper_83.pdf

Autore	Densità Kg/m ³	Conducibilità termica fibre parallele W/mK	Conducibilità termica fibre perpendicolari W/mK
McCabe	133	0.061	0.054
Andersen	90	0.060	0.056
Andersen	75	0.057	0.052
Minke		0.060	0.045

Tabella 14. Studi sulla conducibilità termica Fonte : C. Atkinson (2008) *Energy Assessment of a Straw Bale Building*

La maggiore criticità della paglia è l'igroscopicità della fibra vegetale; sebbene sia un materiale sano e traspirabile, il rischio della proliferazione di muffe è molto elevato se non si riduce l'esposizione prolungata all'acqua e a particolari condizioni microclimatiche che possono determinare il degrado aerobico della fibra. Secondo Lawrence⁵⁰ il rischio del decadimento aerobico dipende da quattro condizioni fondamentali:

- presenza di sostanze nutritive nella paglia;
- disponibilità di ossigeno nella paglia;
- temperatura della paglia;
- umidità libera sulla paglia.

Secondo l'autore, al di sotto dei 10 °C e a temperature superiori a 70°C i batteri e funghi non sopravvivono, mentre la condizione di umidità sfavorevole si raggiunge intorno al valore del 25%; in tale condizione, con la presenza di ossigeno e di sostanze nutritive si generano delle spore e quindi i funghi e i batteri producono il decadimento della paglia. Per quanto riguarda la capacità di resistere al fuoco, i test eseguiti dal Technische Universitat Wien⁹ classificano le balle di paglia con il codice F90, ovvero un materiale dotato di una resistenza al "fuoco normale", che prima di bruciare deve essere esposto al fuoco per 90 minuti. I test sono stati eseguiti su balle di paglia con intonaco di calce di 3 cm, la cui presenza è fondamentale perché rappresenta uno strato di protezione in caso di incendio e un ritardo nella combustione; questo aspetto quindi mostra che la tecnica costruttiva può incidere (seppur con indici modesti) sui valori di resistenza al fuoco. Minke e Mahalke⁵¹ riportano che dai test realizzati in Usa (SHBAGRA test) la resistenza al fuoco è addirittura di 120 minuti. Oltre all'attacco biologico uno dei timori che sorgono quando si parla della paglia in edilizia è l'eventuale presenza di roditori; tale problematica è irrilevante, perché la compressione delle balle, ma anche della paglia impiegata in elementi prefabbricati sconsiglia che i roditori possano insediarsi nella parete in paglia. La verifica di resistenza al fuoco per alcuni pannelli prefabbricati dimostra valori di resistenza al fuoco ancora più soddisfacenti.

I pannelli della ModCell, testati secondo la norma BS EN 1364-1 : 19998 con una temperatura di 1000 °C, si sono dimostrati resistenti al fuoco per 135 minuti (anche se il test è stato sospeso volontariamente, quindi potrebbero avere anche una resistenza maggiore). Per questo



Figura 64. Prova di resistenza al fuoco di un pannello ModCell

9. http://www.tuwien.ac.at/aktuelles/news_detail/article/3121/

51. Cfr. G. Minke and F. Mahlke Building with straw, pag.34

52. L'euroclasse attesta la reazione al fuoco e non la resistenza, è normata dalla UNI EN 13501-1:2009

prodotto, lo strato di calce ha raggiunto una resistenza di 90 minuti, mentre quella della paglia è stata di 45 minuti. Secondo le informazioni della scheda di prodotto il biopannello prespaglia è un materiale incombustibile, euroclasse⁵² A1. Anche per il pannello Ekopanely, la resistenza al fuoco è verificata con la norma UNI EN 13501-, mentre l'euroclasse del prodotto è la E, ovvero è un materiale combustibile ma non facilmente infiammabile.

2.3 Le costruzioni in paglia in Italia

2.3.1 Disponibilità delle materia prima a scala nazionale

La diffusione delle case in paglia sul territorio italiano è molto puntuale e frammentata; secondo i dati raccolti nel censimento delle case in paglia, questa tipologia costruttiva è diffusa soprattutto nelle aree del Nord-Italia; solitamente si utilizzano le ballette di piccole dimensioni, per non avere problemi di messa in opera, la metodologia costruttiva consentita è quella GREB e Load-Bearing questo perché la paglia non è considerato un materiale edilizio conforme alle disposizioni del DM 14/01/2008 sulle norme tecniche sulle costruzioni e quindi per poter essere utilizzato con tale funzione deve essere valutato dal Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici il quale rilasciando l'Attestato di Idoneità Tecnica all'Impiego consente tale impiego. L'iter per il rilascio dell'attestato è oneroso e con laborioso pertanto si tende a non procedere con l'applicazione strutturale delle basse di paglia ma con seguendo le modalità succitate. Da quanto detto, è evidente che il limite dell'utilizzo della paglia come materiale edile è legato a molteplici fattori, alcuni di questi sono:

STRAW_WIND Ventilated roof
Sviluppo e sperimentazione di un sistema/componete
per coperture ventilate ecosostenibili
prodotte dalla conversione "by products" della paglia

- assenza di una normativa tecnica specifica;
- disinformazione sulle prestazioni del materiale;
- scarsa conoscenza sulla messa in opera del materiale;
- assenza di filiere di prodotto;

Allo stato attuale, le principali argomentazioni riguardanti le filiere di gestione della paglia si concentrano sul potenziale scenario d'uso per fini energetici della biomassa. Prendendo atto dei dati riportati nello studio Enama⁵³ emerge che su tutto il territorio nazionale, la disponibilità totale di biomasse da paglie (cereali, l'avena, l'orzo, la segale, il riso, ecc) è di circa 9.356.471 t/anno s.s.; dal dettaglio regionale sulle stime delle disponibilità di paglia (Fig. 65) si riscontra che le maggiori produzioni ricadono nel territorio nel nord, mentre le regioni del sud maggiormente vocate alla produzione delle paglie sono la Puglia e la Sicilia, tale dato giustifica l'enorme interesse riscontrato dagli imprenditori pugliesi verso la valorizzazione di questo sottoprodotto). Anche i dati Istat⁵⁴ evidenziano che tra le diverse coltivazioni che interessano il comparto agricolo italiano quelle di cereali sono le più produttive sia in termini di superfici coltivate che in termini di produttiva, positivi sulla produzione di cereali e quindi di conseguenza sulla relativa produzione del sottoprodotto (Fig. 66).

2.3.2 I benefici ambientali dell' impiego della paglia nelle costruzioni

Uno studio sulla filiera agricola delle balle di paglia della regione toscana, prodotto dall'Università di Firenze⁵⁵, ha dimostrato che la percentuale maggiore di paglia prodotta è destinata alla cessione a terzi; in questo studio si riportano anche i dati sulla riduzione dell'impatto

STRAW_WIND *Ventilated roof*
Sviluppo e sperimentazione di un sistema/componete
per coperture ventilate ecosostenibili
prodotte dalla conversione "by products" della paglia

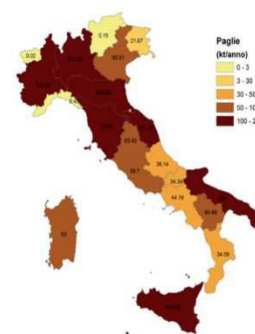


Figura 65 Distribuzione paglie da cereali stimate a livello regionale (periodo di riferimento 2006-2009, dati espressi in kt/ha) fonte: www.enama.it/

53. Lo studio, promosso dal Mipaaf, affronta la gestione delle biomasse per scopi energetici, nello specifico compone lo stato dell'arte delle diverse filiere agroenergetiche nazionali con lo scopo di fornire agli operatori del settore strumenti ed informazioni necessari all'auspicato sviluppo di tali filiere.

54. <http://daticensimentoagricoltura.istat.it/>

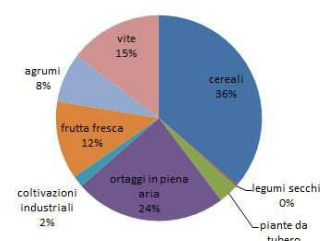


Figura 66. Produzioni agricole in Italia, rielaborazione autore da dati Istat.

55. Conti, L., Dainelli, R., Pellegrini, P., Bonotti, L., & Spugnoli, P. (2013). STUDIO DI FILIERE AGRICOLE SoSTeNIBILI PeR LA PRoDUZIone DI BALLE DI PAGLIA DA CoSTRUZIone-RISULTATI PRELIMINARI. L'edilizia rurale tra sviluppo tecnologico e tutela del territorio, 239.

ambientale prodotto dalla sostituzione del laterizio con elementi in paglia. Infatti, è stato previsto che impiegando circa 100.000 t di paglia per usi edili si potrebbe trattenere circa 158.000 t CO₂ equivalente; ciò in termini di compensazione dei gas serra corrisponde a 45.000 t di gasolio (3,5 kg CO₂/kg gasolio), ovvero pari a circa il 2% del fabbisogno nazionale. La sostituzione del laterizio con le balle di paglia, inoltre, potrebbe garantire una riduzione di carbonio notevole; la mancata produzione di materiale edilizio, secondo tale studio potrebbe comportare un “carico ambientale evitato” pari a - 147,4 kg CO₂/m² per la “non produzione” di laterizi tradizionali⁵⁶. Si riporta l’impatto ambientale del pannello in paglia della Modcell⁵⁷ :

Embodied Carbon equivalent	- 45 CO ₂ kg eq/ m ² ,
Energy Embodied	521MJ/m ²

L’ impatto ambientale dell’uso della paglia è motivo di studio a diverse scale di dettaglio; vi sono infatti delle ricerche che verificano la LCA del sistema edilizio costruito in paglia e altre che propongono delle valutazioni di prodotto.

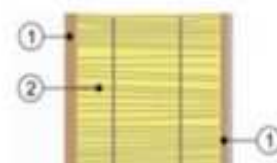
Secondo lo studio degli autori Brojan, L., Petric, A., & Clouston, P. L. (2013) , dal punto di vista economico una parete realizzata in laterizio può avere un costo maggiore di una realizzata in paglia sia in termini ambientali che in termini economici; così per produrre un m² di parete in paglia occorrono circa 47.71 euro/m², mentre per una parete in laterizio occorrono 54.22 euro/m².

Poiché il prezzo della parete in laterizio è legato al costo del materiale impiegato per coibentare la parete, nella stratigrafia in paglia, dove non occorre introdurre materiali isolanti, il costo è ridotto (Fig 37)

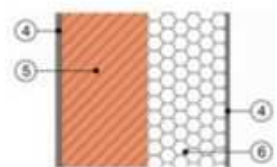
STRAW_WIND Ventilated roof
Sviluppo e sperimentazione di un sistema/componete
per coperture ventilate ecosostenibili
prodotte dalla conversione “by products” della paglia

56. Per realizzare un 1 m² di muro in laterizio occorrono 134 mattoni doppi (norma UNI 12x12x25 cm), posto che le emissioni medie di produzione sono pari a 0,4 kg CO₂/kg, e il peso di ogni singolo elemento è pari a 2,75 kg, si riscontrano carichi ambientali pari a 147,4 kg CO₂/m², questo è il valore del carico da sottrarre se si impiega la paglia al posto del laterizio.

57. <http://www.bc.bangor.ac.uk/news-and-resources/news/documents/WelshSoftwoodsInConstructionReportNov13.pdf>



parete in paglia :1. intonaco argilla, 2. paglia, 3. intonaco argilla, 4. intonaco calce.



Parete in mattoni 4. intonaco cemento 5. laterizio 6. isolante eps 7. intonaco cemento

Figura 67 confronto stratigrafie parete in paglia parete in mattoni fonte : Brojan, L., Petric, A., & Clouston, P. L. (2013).

Per quanto riguarda gli impatti ambientali e gli indici di energia primaria, acidificazione e riscaldamento potenziale si hanno i seguenti valori:

- dal confronto tra le due pareti risulta che l'energia primaria (PEI) richiesta per produrre il muro di mattoni (985,65 MJ) è circa 9 maggiore di quella della parete in paglia 104.83 MJ
- Il Potenziale di acidificazione (AI) mostra che la stratigrafia del muro in paglia ha un valore di $0.052275 \text{ kgSO}_2\text{eq}$, mentre il muro di mattoni raggiunge $0.216688 \text{ kgSO}_2\text{eq}$.
- Il potenziale di riscaldamento globale GWP, ha un valore negativo di $-50.037 \text{ kgCO}_2\text{eq}$ per il muro balle di paglia e $61.548 \text{ kgCO}_2\text{eq}$ per il muro di mattoni.

2.3.3 Esempi di case in paglia in Italia

La costruzione in paglia in Italia, come è stato evidenziato nel censimento delle costruzioni in paglia nel paragrafo 2.3, è ancora una scelta di nicchia. Una tra le più note esperienze italiane è l'eco villaggio Eva, costruito nel territorio abruzzese dopo il sisma del 2009.

La scelta di adottare tale tecnica costruttiva è legata principalmente alla rapidità di esecuzione delle opere edilizie, poiché infatti l'esigenza di costruire rapidamente in caso di sisma è indispensabile per superare la condizione di calamità, e per il ridotto costo: infatti per la costruzione di una casa in paglia, con struttura portante in legno, occorrono dagli 800 ai 1400 euro a metro quadrato, mentre per una casa in cemento occorrono circa 1.800 euro al metro quadrato. Complessivamente l'eco villaggio propone la costruzione di sette corpi di fabbrica nei pressi del borgo di Pescomaggiore (Fig.68); gli edifici sono realizzati impiegando la paglia come struttura portante, anche se la struttura



Figura68. eco-vilalggio Eva Pecomaggiore (AQ). BAG Architetti



Figura 69. Fasi costruzione del villaggio Eva Pescomaggiore (AQ)

STRAW_WIND Ventilated roof
Sviluppo e sperimentazione di un sistema/componete
per coperture ventilate ecosostenibili
prodotte dalla conversione "by products" della paglia

portante in legno si è resa indispensabile per questioni normative; la realizzazione è avvenuta in modalità di autocostruzione, mentre l'aspetto progettuale è stato curato dal gruppo BAG⁵⁸, ovvero uno degli studi più fortemente impegnati nella diffusione delle costruzioni in paglia; è di questo gruppo di progettazione la prima costruzione in paglia realizzata nel centro abitato, a partire dal 2011 nel quartiere Quadraro di Roma è stata realizzata un'abitazione di 1 solo piano di circa 180 mq adottando il metodo GREB (Fig. 70).

Gli esempi illustrati fino a questo momento sono composti da edifici monopiano e dalle geometrie molto semplici, tuttavia è errato considerare la casa in paglia come una tecnologia prima di "espressione compositiva"; alcuni esempi di costruzioni in paglia realizzate dagli architetti W. Schmidt e M Schwarz, dimostrano che l'uso della paglia come materiale edilizio è un valore aggiunto e non un limite progettuale. Nel progetto di Casa Dalsant, realizzato nel 2003 a Cortaccia (Bz), i progettisti propongono un'abitazione di due piani a cui si aggiunge un terzo mansardato (Fig. 71); la particolarità della costruzione è fornita dalla copertura a falda modellata con delle travi reticolari secondo una forma curva. La struttura portante del fabbricato è composta dal legno di abete rosso a telai fabbricati a piè d'opera, rivestiti internamente con un assito diagonale. Il tamponamento, è stato realizzato mediante elementi in paglia, pressata e confezionata in blocchi da 100 x 50 x 35 cm in modo da risultare relativamente leggeri e poter quindi essere posti in opera con facilità. Grazie allo spessore imponente di isolamento sia in parete (50 cm) che nel tetto (60cm), vengono agevolmente coperti gli standard energetici passivi, come dimostrato dal calcolo effettuato per la certificazione CasaClima²¹. L'edificio, proprio in virtù delle caratteristiche coibentanti della paglia



Figura 70. Fasi di costruzione alloggio quartiere quadraro Roma. BAG Architetti

58. Beyond Architecture Group è uno studio di progettazione fondato nel 2009 da Paolo Robazza. Con base a Roma, è attivo nell'ambito dell'architettura sostenibile. Utilizzando materiali locali e naturali, BAG sperimenta tecnologie innovative, riprende tecniche tradizionali e sviluppa soluzioni di design che consentono un elevato risparmio energetico e benessere dell'abitare.



Figura 71. Casa DALSANT Cortaccia (Bz) Arch. W. Schmidt e Margareta Schwarz



Figura 72. Casa DALSANT (Bz) Arch. W. Schmidt e Margareta Schwarz. Fasi di costruzione

STRAW_WIND *Ventilated roof*
Sviluppo e sperimentazione di un sistema/componete
per coperture ventilate ecosostenibili
prodotte dalla conversione "by products" della paglia

ha vinto il Premio migliore CasaClima della Provincia Autonoma di Bolzano nel 2003; il rendimento energetico di casa Dalsant, calcolato a costruzione completata, ha rivelato un fabbisogno termico di riscaldamento pari a 15,97 kWh/m² annui, rientrando così all'interno della categoria di edificio passivo senza che questo fosse inizialmente un punto da perseguire durante la progettazione. La certificazione CasaClima è un metodo di certificazione energetica degli edifici presentato nel 2002 in ottemperanza a che tratta la questione della certificazione energetica degli edifici. La normativa proposta dalla Provincia di Bolzano, impone da aprile 2011 la "classe B" come standard minimo a cui riferire la progettazione e la realizzazione degli edifici. Gli edifici di "classe B" devono avere valore di fabbisogno energetico inferiore a 50 kWh/m²a all'anno. Soluzioni migliorative certificabili comprendono la "classe A" (≤ 30 kWh/m²a pari a 3 litri/m², detta anche "casa da 3 litri") e la "classe oro" (≤ 10 kWh/m²a pari a 1 litro/m², detta anche "casa da 1 litro"). È possibile certificare gli edifici anche all'esterno della Provincia di Bolzano. Nel 2006 gli stessi architetti nel progetto degli alloggi ricettivi realizzati a Lana 2006 mettono in opera le balle di paglia secondo la tecnica Nebraska; il progetto viene sviluppato proponendo quattro ambienti adiacenti a forma arcuata alti un piano (Fig.73); dal punto di vista tecnologico, al piano di fondazione di cemento armato, segue la posa in opera dei solai di calpestio, anche questi sono realizzati in paglia predisponendo il materiale in strutture in legno che fungono da telaio e supporto delle pareti di chiusura verticale che come già detto essendo realizzate secondo la tecnologia Nebraska sono prive della intelaiatura strutturale (Fig.74).

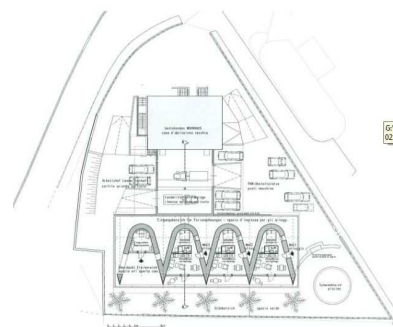


Figura 73. Pinta alloggio turistico ESSERHOF Lana (Bz).
Arch. W. Schmidt e Margareta Schwarz
Fonte : www.archschwarz.com



Figura 74. Fasi di costruzione, posa in opera del solaio di calpestio, realizzazione parete. Fonte: www.archschwarz.com

STRAW_WIND *Ventilated roof*
Sviluppo e sperimentazione di un sistema/componete
per coperture ventilate ecosostenibili
prodotte dalla conversione "by products" della paglia

2.4 Le coperture in paglia

2.4.1 La tecnica costruttiva tradizionale dei tetti in paglia

Come già accennato nel paragrafo 2.1, la tecnologia costruttiva dei tetti in paglia è solo una reminiscenza di una tecnica costruttiva locale, considerando una scala di lettura mondiale, si riscontra che questa tipologia è ampiamente diffusa; i tetti in paglia, non sono adottati solo nelle aree geografiche sottosviluppate (dove le costruzioni per esigenza costruttiva, sono realizzate con materiali poveri e reperibili in loco) ma anche in molti più evoluti. L'aspetto più interessante della tecnologia delle coperture in paglia, risiede nel potenziale che questo materiale così povero possiede; la buona capacità isolante, la traspirabilità, la disponibile a basso costo, il ridotto impatto sono tutti fattori che valorizzano l'uso del prodotto anche come materiale da costruzione per le coperture. Una delle maggiori preoccupazioni considerate nell'applicazione in copertura del materiale è legata alla condizione di durabilità del materiale; dai dati presenti in letteratura⁵⁹ viene affermato che la durata di una buona coperto di paglia si può considerare ottimale per un periodo di 15 anni, e propriamente si può ritenere che fino a 15 anni di durata, non ha bisogno di alcuna riparazione, anzi tale limite temporale può essere esteso a 30 anni se si considera l'incidenza degli interventi di manutenzione. Un tipico esempio di copertura in paglia, che pone in uso il materiale come struttura del tetto e non come componente stratigrafica della copertura è quello posto in essere nelle costruzioni Gassho-zukuri (Fig.75).

La procedura esecutiva adottata per i tetti di questi edifici, può essere assunto come l'iter procedurale di tutte le costruzioni tradizionali in paglia. Anche se in Europa non si prevede come nella struttura

59. Breymann, GA.
Trattato generale di costruzioni civili. Vol. 3: Della copertura dei tetti. Di Baio Editore. Milano.1985



Figura 75. Gassho-zukuri



Figura 76. sezione Gassho-zukuri.
Autore G.Cipollo



Figura 77. Tetto in paglia. Museo dei contadini, Bucarest Fonte: Francese, D., Dabija, A. M., Teleche, O. H., & Mastrangelo, N. (2015). Employing Second Matter from Agricultural Sector in Architecture: A Comparison Between the Italian and Romanian Situation

STRAW_WIND *Ventilated roof*
Sviluppo e sperimentazione di un sistema/componente
per coperture ventilate ecosostenibili
prodotte dalla conversione "by products" della paglia

giapponese l'utilizzo del sottotetto e quindi la geometria del tetto è diversa come discorso generale si rifanno alle stesse azioni.

Le fasi di esecuzione di un tetto in paglia si possono riepilogare nel seguente modo:

- disposizione di una struttura portante in legno, con travi primarie e secondarie, nonché listellature orizzontali e verticali poste ad intervalli regolari (Fig.78) ;
- raccolta, essiccazione e legatura in fasci di paglia, con un diametro di circa 40-50 cm (Fig. 79);
- per la posa in opera dei singoli fasci sulla struttura portante in legno; i fasci vengono accostati l'uno all'altro e quindi fissati alla struttura in legno; per la posa in opera si parte dalla linea di gronda fino ad arrivare alla linea di colmo (Fig.80). Durante la loro posa, i fasci vengono tenuti in posizione mediante staffe di ferro nel caso dei tetti in paglia europei oppure rami di Bamboo o di salice nel caso dei tetti giapponesi.
- segue la battitura dei fasci mediante un apposita paletta di legno (Fig.81). segue la potatura con delle cesoie delle fibre che non sono allineate, il risultato finale è quello di un tetto dall'aspetto perfettamente ordinato, pulito e simmetrico.

Lo spessore del tetto in paglia dei tetti Gasshō-Zukuri, in generale è di 50-60 cm; secondo quanto riportato nel testo Breyman, GA. lo spessore minimo delle coperture a falde in Italia è di 30 cm, mentre l'inclinazione utile a ridurre il rischio di infiltrazioni d'acqua deve essere minimo 45°; questi valori possono subire delle variazioni in base alle condizioni climatiche dell'area geografica in cui si sta proponendo la copertura;

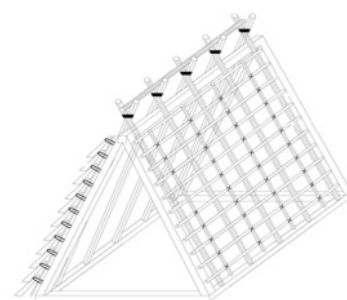


Figura 78. struttura portante del tetto in legno. Rielaborazione dell'autore



Figura 79. Eccecazione fasci di paglia



Figura 80. Posa in opera fasci di paglia sulla struttura di legno



Figura 81. allienamento fasci di paglia

Oltre alla tecnologia costruttiva illustrata in precedenza nel testo di Breymann, G A., sono proposte altre due metodologie di messa in opera della paglia. Nella soluzione A (Fig.82), la paglia viene legata a al travetto orizzontale in legno dopo aver compiuto una rotazione della fibra intorno a questo elemento, l'operazione viene eseguita lungo tutta la larghezza della falda e viene ripetuta per tutta la sua lunghezza ancorando ogni singolo fascio di paglia alla sottostruttura di legno mediante legatura. Nella soluzione B (Fig.83), sulla struttura portante in legno vengono fissate delle lastre di paglia e argilla, dopo di che si procederà con il completamento dello stato superficiale di copertura mediante la posa in opera della paglia; questa soluzione consente una maggior protezione dell'abitazione, infatti la presenza di questo strato riduce il rischio di infiltrazioni nella stratigrafia di copertura.

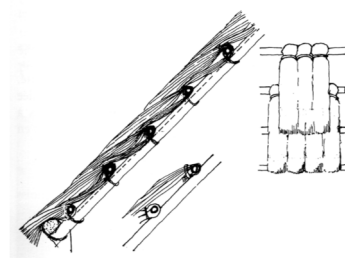


Figura 82. Soluzione A- posa in opera della paglia come strato di copertura
Fonte : Breymann, GA.



Figura 83. Soluzione a posa in opera della paglia come strato di copertura
Fonte : Breymann, GA.

2.4.2 La tecnica costruttiva contemporanea dei tetti in paglia

Accanto alla tradizionale tecnica costruttiva trovano spazio altri modi di porre in opera la paglia nell'ambito delle soluzioni di copertura; utilizzare la paglia sotto forma di balla, la posa in opera è agevole e semplice; le balle possono essere posizionate sia tra le travi (Fig. 84) che sulle travi (Fig.85), inoltre, lo stato di finitura può essere realizzato sia come copertura verde che con le tegole, infine può si può progettare una copertura prevedendo che il peso delle balle di paglia grava sulle travi sottostanti, mentre il carico da neve e del vento viene assorbito da una struttura che risulta indipendente dalle quella su cui grava il peso delle balle di paglia (Fig.86). In merito alla prestazione isolante Minke e Mahalke²⁰ affermano che una copertura in balle di paglia dello

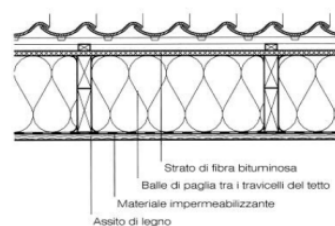


Figura 84. Copertura con balle di paglia posa in opera tra le travi
Fonte : Minke e Mahalke

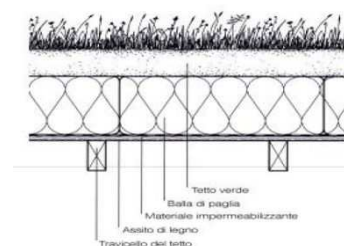


Figura 85. Copertura con balle di paglia sulle travi e copertura verde. Fonte : Minke e Mahalke

STRAW_WIND *Ventilated roof*
Sviluppo e sperimentazione di un sistema/componete
per coperture ventilate ecosostenibili
prodotte dalla conversione "by products" della paglia

spessore di 35 cm consente di ottenere un valore di trasmittanza termica variabile da 0,14 a 0,16 W/m²K pari.

Dal punto di vista delle coperture, l'interpretazione moderna dell'uso della paglia ha portato a definire delle architetture dove questo materiale è dichiarato come superficie d'involucro continua e compatta; infatti, la paglia, priva di elementi di rivestimento, configura l'aspetto dell'opera architettonica stessa. Osservando alcune importanti costruzioni diffuse nel contesto Europeo evidenziano un forte interesse verso questo materiale tradizionale povero; per il Municipio di Midden- Delfland (Olanda), i progettisti Arnold Homan e Jeroen Simons dello studio INBO si ispirano alle case coloniche della Regione per definire l'elemento di copertura dei cinque volumi che compongono l'edificio pubblico (Fig. 87); sulla struttura portante composta da travi in acciaio viene realizzato l'elemento involucro della copertura e della facciata in canne e paglia; la singolarità del progetto risiede nella defezione di una superficie di copertura dalla forma ondulata che non si sviluppa dalla copertura fino alla facciata (Fig.88). La caratteristica principale della copertura in paglia/canne evidenzia l'uso del materiale non soltanto sulla chiusura superiore ma su quelle verticali, è l'intero involucro edilizio ad essere caratterizzato dall'uso di questi materiali. Anche l'architetto Arjan Reas nel progetto di una residenza a Zoetermeer (Paesi Bassi) rifacendosi alle capanne tradizionali, presenti nel territorio, propone sulle chiusure verticali una struttura in mattoni ricoperta da un involucro in paglia che partendo dalla copertura si estende fino quasi alla quota di calpestio (Fig. 89); lo scopo di questa scelta progettuale è quello di utilizzare la paglia come stato isolante e di protezione, mantenendo una coibentazione termico-acustica che riduce il dispendio energetico. valorizza l'uso della paglia ricoprendo

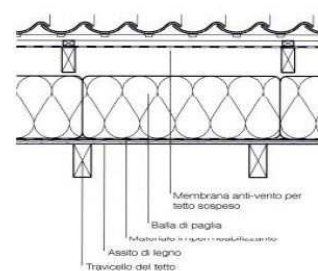


Figura 86. Copertura con baie di paglia sulle travi e copertura sospesa. Fonte : Minke e Mahalke

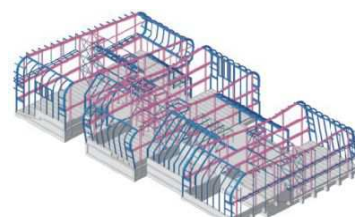


Figura 87. Municipio di Midden-Delfland. Arch Arnold Homan e Jeroen Simons 2013



Figura 88. Residenza privata in paglia, Paesi Bassi . Arch Arjan Reas 2010



Figura 89. Pianta e sezione di una residenza privata in paglia. Arch Arjan Reas 2010

STRAW_WIND *Ventilated roof*
Sviluppo e sperimentazione di un sistema/componete
per coperture ventilate ecosostenibili
prodotte dalla conversione "by products" della paglia

In generale è possibile affermare che nelle costruzioni dei “thatched roof” stanno vivendo una vera propria rinascita e valorizzazione, sempre più architetti impiegano questo materiale come materiale edilizio; le architetture che vengono prodotte non risentono di un linguaggio “retro e tradizionalista” ma sono ben armonizzate con il contesto e con l’architettura contemporanea (Fig. 90). Un esempio di copertura moderna che utilizza le balle di paglia è quello proposto realizzata dall’architetto Schwarz M, per la ristrutturazione di Casa Mair a Merano. L’edificio da riqualificare è costituito da un’abitazione costruita negli anni ‘70 da ristrutturare; la scelta adottata per conferire alla struttura una classe energetica elevata è stata quella di demolire la vecchia mansarda e ricostruirne una nuova che impiegasse materiali bioedili, si è quindi deciso di intervenire progettando una copertura a cupola con legno lamellare e balle di paglia (Fig.91); L’utilizzo delle balle di paglia come coibente ha permesso di ottenere un valore di U pari a $0,11 \text{ W/m}^2\text{K}$;



Figura 90. Woonhuis Laren. Maas Architect



Figura 91. Ristrutturazione Casa Mair a Merano (Bz), arch. Schwarz M. plastico e fase di costruzione

STRAW_WIND *Ventilated roof*
Sviluppo e sperimentazione di un sistema/componente
per coperture ventilate ecosostenibili
prodotte dalla conversione “by products” della paglia

3. CAMPO DI APPLICAZIONE DELLA PROPOSTA DI RICERCA:COMPONETI DI COPERTURA COIBENTANTI

3.1 L'efficienza energetica degli involucri di chiusura

Le superfici d'involucro edilizio⁶⁰ (sia che si tratti di chiusure verticali che di chiusure orizzontali) rappresentano l'elemento di frontiera tra l'ambiente interno e quello esterno, nello specifico l'involucro è costituito dalla sommatoria di tutte le superfici che entrano in contatto con l'ambiente esterno; secondo le moderne concezioni sugli involucri energetici, tale elemento deve essere valutato come la "terza pelle" dell'uomo, quindi deve garantire dal punto di vista fisico il benessere termo-igrometrico⁶¹ dell'unità abitativa, il comfort ambientale⁶² e una buona prestazione energetica. Usando una citazione di Spadolini l'involucro è "*quell'insieme di connessioni tra interno ed esterno connaturate alle modalità di scambio desiderate tra uomo e ambiente fisico*".

Il comportamento ambientale dell'involucro è la sapiente iterazione tra sistema edificio-impianto-ambiente esterno.

E' possibile delineare quattro modelli di interazione tra l'ambiente e il sistema edilizio:

- Modello conservativo: si fonda sull'uso dell'inerzia termica della massa muraria. In questo caso la diversificazione delle soluzioni dipende, oltre che dalla massa, anche dall'esposizione, dalla morfologia e dalle condizioni al contorno.
- Modello selettivo: questo modello si caratterizza per l'impiego di facciate anisotrope⁶³; il rapporto interno esterno

60. L'involucro edilizio, nel processo di ricerca e sperimentazione tecnologico-architettonica, si è trasformato negli anni, dall'indicare con tale termine i singoli elementi tecnici di chiusura definiti dalla UNI8290 si è passati ad utilizzare tale termine composto da elementi complessi, una interfaccia dinamica che consente al microambiente esterno di agire su quello interno, mediante scambi di flussi.

61. Si riferisce alla sensazione di soddisfazione che le persone provano all'interno di un ambiente circa la sensazione termica (caldo/freddo), le condizioni che influenzano tale parametro sono:

- ambientali (temperatura dell'aria= T_a ; , temperatura media radiante delle superfici che delimitano l'ambiente= T_{ma} ; umidità relativa dell'aria= P_w ; velocità dell'aria= v_a);
- individuali (attività fisica svolta= M , ,resistenza termica dell'abbigliamento = cloequazione benessere Fanger: $f(M, clo, v_a, T_a, T_{ma}, P_w) = 0$, poiché spesso l'elaborazione della formula è complessa esistono dei grafici che UNI EN ISO 7730 Ambienti termici moderati - Determinazione degli indici PMV e PPD e specifica delle condizioni di benessere termico.

62. Corrisponde alla condizione di benessere determinata dalle percezioni sensoriali di un individuo inserito in un ambiente, i parametri che influiscono sul comfort ambientale sono:

- temperatura,
- umidità dell'aria,
- rumorosità,
- luminosità.

propone delle soluzioni di parete diversificate in base all'orientamento.

- Modello rigenerativo: il questo modello l'involucro si comporta come una barriera che diminuisce l'interazione tra esterno ed interno, il controllo ambientale è affidato totalmente ai sistemi impiantistici.
5. Modello ambiental-interattivo o bioclimatico avanzato: il controllo ambientale è basato sull'intesa tra edificio e ambiente esterno con possibilità di gestire i flussi di energia attraverso la regolazione di dispositivi fissi o mobili quali frangisole, bocchette di ventilazione ecc. L'elemento caratterizzante di tale modello è l'anisotropia dinamica⁶⁴.

L'innovazione tecnologica e la progettazione sostenibile distingue gli involucri in : passivi, attivi e ibridi.

L'involucro passivo è quello che massimizza il guadagno solare diretto mediante l'uso di superfici vetrate orientate secondo la maggiore esposizione solare e spazi cuscinetto per la protezione dal freddo, nonché dispone di tecnologie passive. L'involucro è definito attivo quando integra i sistemi impiantistici sia che si tratti di dispositivi per la raccolta e la trasformazione dell'energia solare sia che risolvono la ventilazione artificiale degli ambienti interni).

La combinazione degli involucri passivi e attivi genera l'involucro ibrido; la caratteristica dell'involucro ibrido è la complementarità delle tecnologie impiantistiche e quelle edilizie. La caratterizzazione degli involucri dinamici, è la contemporanea sfida della tecnologia dell'architettura; la progettazione dei dispositivi *smart* delinea gli "organismi edilizi"⁶⁵ attraverso le avanguardie tecnologiche.

63. Le facciate anisotrope sono quelle che presentano nelle facciate a sud grandi vetrate per strutturare il guadagno solare, mentre a nord presentano una parete massiva con piccole aperture.

64. Rappresenta la capacità di offrire delle soluzioni differenziate in funzione delle esposizioni delle facciate, inoltre prevede che si possano modificare i vari flussi ambientali a seconda delle condizioni climatiche del luogo.

65. E' l'insieme strutturato di elementi spaziali e di elementi tecnici, atte al soddisfacimento delle esigenze abitative, caratterizzate dalla funzionalità delle singole parti e reciprocità delle composizioni d'insieme.

In linea generale, osservando le esperienze straniere è possibile documentare l'evoluzione della tecnologia in funzione delle mutate esigenze ambientali che a partire dagli anni '70 iniziano a delineare la problematica energetica e la sostenibilità dei sistemi edilizi. Se per Jean Nouvel l'utilizzo dei diaframmi in metallo applicati sulla facciata l'Institut du Monde Arabe (Fig.92) ha lo scopo di rievocare il linguaggio stilistico dei motivi ornamentali del mondo arabo (l'apertura e la chiusura meccanizzata ad intervalli regolari dei diaframmi dovrebbe consentire di far filtrare la luce nello spazio interno secondo l'aspetto e le geometrie delle costruzioni arabe), nel progetto delle torri Al Bahr di Abu Dhabi (Fig.93) il team Aedas propone mediante l'innovazione tecnologica un involucro edilizio dalle alte prestazioni energetiche; l'uso di una struttura a nido d'ape aperta e chiusa mediante regolazione automatica azionata dall'incidenza della radiazione solare (Fig. 94) consente di adottare un'innovazione che oltre a garantire "eco efficienza" del progetto di architettura, consente di definire l'involucro come il luogo nel quale si concretizza uno specifico linguaggio tecnologico, ovvero diviene il luogo in cui è possibile testimoniare l'evoluzione tecnica e produttiva del momento storico in cui viene realizzato. Il concetto di eco-efficienza, racchiude in sé il valore del guadagnare di più producendo un minore impatto ambientale. L'introduzione del concetto risale al 1992 quando in occasione della Conferenza Mondiale di Rio sull'Ambiente e lo Sviluppo si dichiarò che: "si ottiene l'eco-efficienza quando la fornitura di beni e servizi offerti a prezzi competitivi consente di soddisfare i bisogni umani migliorando la qualità della vita e riducendo progressivamente gli impatti ecologici e



Figura 92. Institut du Monde Arabe



Figura 93. Torri Al Bahr di Abu Dhabi



Figura 94. Schermatura a nido facciata torri Al Bahr

l'intensità d'uso delle risorse utilizzate durante il ciclo di vita del prodotto o servizio commisurandolo alla capacità di carico⁶⁶ del pianeta”.

Per OCSE⁶⁷ l'eco-efficienza è “*efficienza con la quale le risorse ecologiche sono usate per andare incontro ai bisogni umani*”; mentre per Manzini⁶⁸ è il “rapporto tra il valore di un prodotto e il suo impatto ambientale” cioè il grado con cui viene coniugata la riduzione dell'impatto in tutte le fasi di vita del prodotto o dei servizi (produzione, distribuzione, uso e dismissione dei prodotti) e il relativo aumento della qualità.

I principi basilari dell'eco-efficienza secondo il WBCSD⁶⁹ sono:

1. Riduzione dell'intensità delle materie utilizzate;
2. Riduzione dell'intensità dell'energia utilizzata;
3. Riduzione della dispersione di sostanze tossiche;
4. Riciclabilità dei materiali;
5. Ottimizzazione dell'uso di risorse rinnovabili;
6. Aumento della durata del prodotto;
7. Aumento dell'intensità dei servizi.

Dal punto visto normativo, le disposizioni sulle prestazioni energetiche delle costruzioni fanno capo alla direttiva 2010/31/CE - NZEB -Near Zero Energy Building, tale direttiva che ha ripreso e sostituito la direttiva 2002/91/CE⁹⁰ indica il 31 dicembre 2020 come data ultima in cui tutti gli edifici di nuova costruzione siano edifici privati a energia "quasi" zero e il termine del 31/12/2018 per gli edifici pubblici. In Italia le direttive sull'efficienza energetica sono state recepite dal *Decreto n. 192 del 19 agosto 2005*, successivamente corretto e integrato dal *Decreto n. 311 del 29 dicembre 2006*, (il quale

66. Rappresenta il carico massimo che un territorio può sopportare senza che venga compromessa la sua produttività, cioè la capacità da parte dell'ambiente di fornire risorse e assorbire rifiuti prodotti dall'attività umana; La sostenibilità dell'uso delle risorse si ottiene solo sussiste l'equilibrio tra i flussi di prelievo e la velocità di rigenerazione; l'attenzione è posta sulla quantità di territorio disponibile, e non la quantità di risorse necessaria a sostenere una popolazione su un determinato territorio.

67. Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico.

68. Cfr. Manzini, E., Verzoli, C. (1998). Lo sviluppo di prodotti sostenibili. I requisiti ambientali dei prodotti industriali.

69. Il WBCSD è stato creato nel 1995 da una fusione del Business Council per lo sviluppo sostenibile e il Consiglio industria mondiale per l'ambiente, è un network composto da circa 200 aziende internazionali che si occupano esclusivamente di attività e lo sviluppo sostenibile

ha imposto dei valori di trasmittanza ancora più restrittivi) e dal *Decreto n. 63 del 4 giugno 2013* “Disposizioni urgenti per l’attuazione di obblighi comunitari e per il recepimento della direttiva 2010/31/UE in materia di prestazione energetica nell’edilizia”. Sebbene l’orientamento normativo imponga delle prescrizioni specifiche sulla nuova costruzione è bene ricordare che nel nostro territorio più che intervenire sulle nuove costruzioni si dovrebbe intervenire su quelle preesistenti. Secondo i dati del rapporto Cresme 2014⁹¹ sulla valutazione economica degli interventi di coibentazione sul patrimonio edilizio italiano emerge che intervenire sulla nuova produzione edilizia non è sufficiente a garantire i risultati richiesti in termini di risparmio energetico dalle disposizioni Europee, infatti l’indagine rivela che il patrimonio edilizio preesistente è di oltre 12,5 milioni di edifici esistenti (che comprendono 34,7 milioni di unità abitative e non residenziali), mentre gli immobili che vengono annualmente costruiti sono circa 55mila (il dato fa riferimento a una media degli ultimi anni).

3.2 Superfici di copertura: potenziale coibentante e strategie di involucro

Come accennato in precedenza per arginare il divario energetico che esiste tra le prestazioni energetiche degli edifici esistenti e quelle dei nuovi occorre attuare un piano strategico di recupero e riqualificazione energetica. Secondo i dati CRESME le potenziali superfici coibentabili sono ripartite secondo i seguenti valori percentuali (Fig.96) :

STRAW_WIND *Ventilated roof*
Sviluppo e sperimentazione di un sistema/componete
per coperture ventilate ecosostenibili
prodotte dalla conversione “by products” della paglia

90. La Direttiva 2002/91/CE EPBD - Energy Performance of Buildings è stato il primo provvedimento normativo che ha imposto la certificazione energetica agli stati della comunità europea; inoltre al fine di migliorare l’efficienza energetica nel settore edilizio, responsabile del 40% di consumo dell’energia, ha imposto gli obiettivi sulla riduzione dei consumi energetici del 22% entro il 2010 e quindi sul risparmio di energia primaria pari a 55 mln di tep ed una riduzione di emissioni di CO2 quantificabile in 100 milioni di tonnellate.

91. Il CRESME è il Centro di ricerche di mercato che fornisce al settore privato e alle istituzioni pubbliche informazioni e know-how per descrivere e prevedere l’andamento dell’economia e del mercato delle costruzioni al livello territoriale, nazionale e internazionale.
http://www.fivra.it/f/documenti/Rapporto_CRESME_set14.pdf

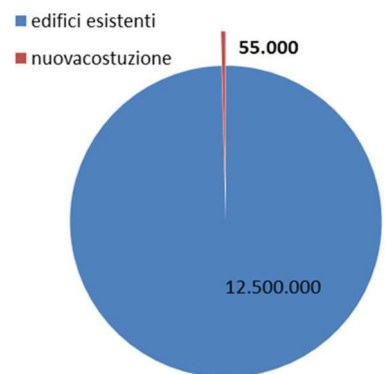


Figura 95. Confronto tra i valori unità abitative esistenti e edifici di nuova costruzione

- il 52% è occupato dalle superfici di copertura (81,3 milioni di mq medi annui di cui 12,2 milioni mq di nuova costruzione e 69,1 milioni mq di interventi di manutenzione);
- il 31% dalle superfici perimetrali (47,4 milioni mq);
- il 17% dai primi solai e sottotetti (26,7 milioni di mq di primi solai e sottotetti).

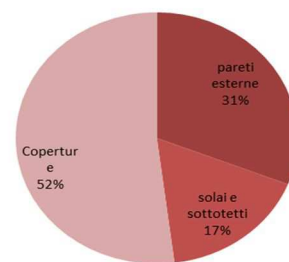


Figura 96. Valori percentuali delle tipologie di intervento poste in atto per superfici le superfici verticali

Nonostante l'evidente potenziale delle superfici di copertura, nel nostro paese si tende a preferire l'intervento coibentante delle chiusure verticali a quello delle chiusure superiori; nello specifico la tipologia di intervento più diffuso è il *cappotto esterno* (Fig 97).

In termini energetici, tale pratica non presenta nessun tipo di critica, anzi risulta essere l'intervento più gestibile dal punto di vista economico. Riguardo l'uso dei materiali ecosostenibili, occorre invece riflettere sugli impatti ambientali dei prodotti sintetici (EPS, XPS) e quelli naturali; infatti nell'ottica della gestione della salvaguardia ambientale si possono ad esempio alcuni prodotti alternativi come la canna palustre (Fig.98) può senz'altro risultare più vantaggioso.

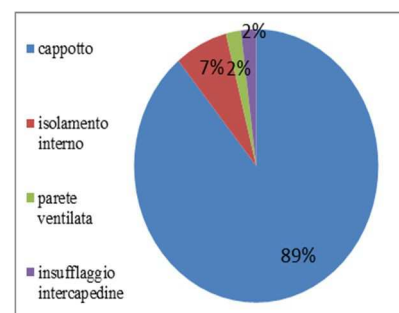


Figura 97. Valori percentuali delle tipologie di intervento poste in atto per superfici le superfici verticali



Figura 98. Cappotto in canna palustre

Le tecnologie innovative attualmente più diffuse sono le seguenti:

- DOPPIA PELLE: “rappresenta il punto di arrivo per la concezione dell'involucro quale filtro attivo tra interno ed esterno in contrapposizione al ruolo di semplice chiusura *passiva* per gli spazi interni”⁹².
- PARETI VERDI “per parete verde viene inteso un fronte edilizio ricoperto da specie vegetali intrinseche caratteristiche



Figura 99. Torre e Monolite – Via Kuliscioff Milano

STRAW_WIND *Ventilated roof*
Sviluppo e sperimentazione di un sistema/componete
per coperture ventilate ecosostenibili
prodotte dalla conversione “by products” della paglia

92. Cfr M. Rossetti in Sinopoli, N., & Tatano, V. (Eds.). (2002). Sulle tracce dell'innovazione: tra tecniche e architettura. FrancoAngeli, pag. 232.

rampicanti e/o ricadenti aggrappate direttamente o indirettamente, tramite supporti verticali di sostegno, alla muratura”⁹³.

- **PARETE VENTILATE:** “indica una parete di facciata opaca con rivestimento esterno costituito da elementi di varia fattura (lastre, doghe, tavelle, ecc.), dimensione e consistenza materica, contraddistinti dalla messa in opera a secco, tramite dispositivi di sospensione e di fissaggio di tipo meccanico o chimico-meccanico, che ne mantengono distanziato il lato nascosto dalla retrostante parete di tamponamento, sulla quale è in genere applicato un isolamento a cappotto, in modo da realizzare una sottile intercapedine entro la quale può circolare aria esterna. Tale cavità deve avere spessore sufficiente ad interrompere la continuità fisica tra il rivestimento esterno e gli altri componenti formanti il nucleo interno della parete di facciata e a realizzare una circolazione d’aria attraverso i giunti di accostamento orizzontali e/o verticali tra elemento ed elemento del rivestimento, di regola privi di sigillatura”⁹⁴.
- **MATERIALI A CAMBIAMNETO DI FASE PCM (Phase Change Materials):** quei materiali che attraverso un cambiamento di fase consentono di accumulare il calore latente riescono ad assorbire i flussi energetici termici e a immagazzinare molta energia, mantenendo costante la propria temperatura.
- **TETTO VERDE:** La scelta si riqualificare la copertura utilizzano la tecnologia del tetto verde (Fig.103) risulta ancora una pratica desueta in Italia. Mentre all’estero tale tecnologia viene imposta per legge, nel nostro Paese si propende per l’istallazione coperture fotovoltaiche, come strategia di riqualificazione perseguibile. E’ doveroso ricordare, però che nel dibattito politico



Figura 100. Palacio De Congressos Arch. Vitoria-Gasteiz



Figura 101. Ampliamento IRCAM, Parigi. Arch. R. Piano



Figura 102. Alloggio per anziani a Domat/Ems



Figura 103. The Long House, Norfolk, UK. Hopkins Architects

93. Cfr. Bellomo, A. (2003). Pareti verdi: linee guida alla progettazione. Sistemi.

94 Cfr. Lucchini, A. (2013). Pareti ventilate ad alte prestazioni—Teoria e soluzioni. Rockwool (www.rockwool.it).

attuale si sta discutendo una proposta di legge⁹⁵ che prevede degli incentivi (65%) con detrazioni fiscali de 36% della spesa

- effettuata entro il 31 dicembre 2015 fino ad un valore massimo di 45.000 euro. Allo stato attuale il riferimento normativo per la costruzione di una copertura verde è la norma UNI 11235:2015

L'uso del tetto verde definisce una serie di benefici sia sul sistema edilizio sia a scala urbana; infatti, l'adozione di questa tecnologia consente di risparmiare sull'energia necessaria per riscaldare e rinfrescare l'edificio (20-30% in meno sugli oneri di climatizzazione);

- ridurre il fenomeno delle alluvioni urbane dovute a insufficienti reti di drenaggio, (il fenomeno del ruscellamento durante i nubifragi può essere ridotto fino
- all'80% se si opta per questa soluzione);
- ridurre il fenomeno dell'isola di calore⁹⁶ per effetto l'evapotraspirazione del manto vegetale.

Approfondire lo studio sulle strategie sostenibili applicabili sulle coperture è quindi uno step obbligatorio se si intende intraprendere una ricerca sul potenziale uso dei coibentanti organici sull'estradosso del sistema di copertura. I benefici legati all'impiego di queste tecnologie si ripercuotono non solo sulle prestazioni termiche e quindi sulla classe di esigenza del *benessere*⁹⁷ de sistema edilizio, ma anche sull'*aspetto*⁹⁸ dell'edificio. In questo modo, il processo di riqualificazione energetica diviene l'occasione per migliorare la qualità del sistema edilizio.

Il punto di partenza per la comprensione degli scenari futuri dei

95. DDLS - N. 1270

Disposizioni in materia di incentivi all'utilizzo del verde pensile. DDLS.1896 "Misure di agevolazione fiscale per interventi di sistemazione a verde di aree scoperte di pertinenza delle unità immobiliari di proprietà privata".

96. Generalmente, l'effetto isola di calore è direttamente proporzionale all'estensione dell'area urbana, tanto da poter creare condizioni che portano a rilevare temperature mediamente superiori tra gli 0,5 e i 3 °C rispetto alle campagne limitrofe. L'aumento delle temperature riguarda sia le minime invernali, che le massime estive; mentre nel primo caso la conseguenza è un minor numero di giorni di gelo e/o di ghiaccio, nel secondo caso può determinarsi una maggiore intensità delle onde di calore.

97. Definizione Norma UNI 8289 "insieme delle condizioni relative a strati dell'organismo edilizio ad essere.

98. Definizione norma UNI 8289 "insieme delle condizioni relative alla funzione percettiva dell'organismo edilizio da parte degli utenti".

prodotti naturali isolanti è una ricognizione sullo stato dell'arte dei prodotti coibentanti naturali ma soprattutto occorre prendere visione di quelle che sono le innovazioni di prodotto incentivate all'estero;

Numerose best practices straniere concentrano le proprie ricerche e sperimentazioni sull'uso delle materie prime di scarto; una di questa esperienze è lo studio e la caratterizzazione di un componente isolante partendo dalla biomassa vegetale di *Posidonia mariana*.

La *Posidonia*, erroneamente confusa con le alghe, è una vera e propria pianta marina, poiché ha la stessa struttura delle componenti piante terrestri, ovvero: radici, foglie, fiori. La disponibilità di questo materiale interessa soprattutto le aree del Mediterraneo.

La *posidonia* Oceanica, essendo una pianta, perde ciclicamente le proprie foglie nel periodo autunnale, tale condizione provoca degli effetti sgradevoli lungo le coste, infatti i filamenti vegetali a causa del moto ondoso si riversano sulle spiagge sia in forma di egagropoli⁹⁹ (Fig 104) sia come filamenti singoli (fig 104).

Si stima che una fascia di prateria di 1 km di larghezza possa produrre fino a 125 kg di biomassa (in termini di sostanza secca) ed è proprio partendo dalla gestione della fibra secca spiaggiata che si delineano diversi scenari di utilizzo per questo materiale:

- l'industria cartaria;
- la produzione di biogas;
- la produzione di polimeri termoplastici biodegradabili;
- la progettazione di oggetti per il design;
- il settore agricolo e zootecnico;
- la estetico-cosmesi e l'erboristeria;
- la chimica verde
- l'applicazione edilizia.

99. E' il termine scientifico utilizzato per definire gli agglomerati sferici o ovali di colore marrone chiaro e di consistenza feltrosa costituiti da residui fibrosi di *Posidonia oceanica* che si accumulano sui litorali sospinti dalle onde.



Figura 104. Residui di *posidonia* spiaggiati: egagropoli (foto superiore); foglie singole accumulate sulla spiaggia (foto inferiore)

E' proprio quest'ultima scenario applicativo che si è deciso di riportare nell'ambito di questo studio. L'uso delle alghe come materiale edilizio posto in opera negli elementi d'involucro caratterizza la tecnologia costruttiva delle case Alga dell' isola di Laeso tra Svezia e Danimarca, in questo contesto lo studio Vandkunsten, mediante la costruzione della Modern Seaweed House ha riportato in auge questo tipo di costruzione (Fig.105). Parallelamente a questo esempio si può riportare anche il risultato industriale ottenuto dall'istituto tedesco Fraunhofer e da alcuni partner industriali. Il prodotto finito prende il nome di NeptuTherm, dal punto di vista materico si compone di sola "posidonia", e attualmente è impiegato come materiale sciolto nelle intercapedini (Fig.106). L'intento è quello di produrre dei pannelli isolanti che possano quindi facilitare la posa in opera e possano prevedere la competitività del prodotto finito nel mercato dei pannelli isolanti in fibra vegetale (Fig.107). La fase di produzione del materiale sciolto consente di adottare un processo produttivo con un ridottissimo impatto ambientale, le apparecchiature che consentono di pulire e sminuzzare la fibra di La caratteristica di questa produzione è un processo a ridotto impatto ambientale, le cui fasi di lavorazione sono:

- Scuotimento delle egagropoli per allontanare la sabbia ;
- Separazione dei grumi e riduzione della fibre in segmenti di 1,5 - 2 cm ;
- confezionamento della fibra in sacchetti di plastica.

Le principali caratteristiche di questo prodotto sono:

- biodegradabilità e riciclabilità²¹ del prodotto finito;
- buone prestazioni termiche $\lambda < 0,039-0,044 \text{ W / mK}$;
- elevati indici di Capacità termica $c = 2,502 \text{ J / GK}$ (fig 15).

STRAW_WIND *Ventilated roof*
Sviluppo e sperimentazione di un sistema/componete
per coperture ventilate ecosostenibili
prodotte dalla conversione "by products" della paglia



Figura 105. Modern Seaweed House Studio Vandkunsten.



Figura 106. Posa in opera posidonia sciolta nell'estradosso di copertura



Figura 107. Pannello isolante posidonia. Fonte : Fraunhofer

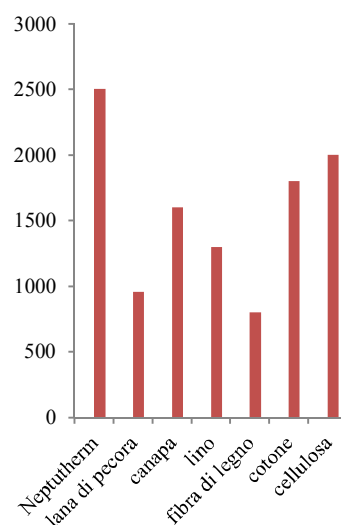


Figura 108. Confronto Capacità termica pannello Neptutherm e altre fibre naturali.

In Italia, una proposta di recupero e valorizzazione della Posidonia è stata avviata dall'azienda Edilana¹⁰⁰ che in analogia alle soluzioni di prodotto PRONTOMAT (Fig.109), cioè i pannelli modulari per coperture ventilate atti a garantire il risparmio energetico e abbattimento dei tempi e costi di manodopera, sta cercando di innovare questo prodotto inserendo come componente isolante la fibra di posidonia (Fig.110). Il prodotto ha vinto il Premio Abitare Verde, ovvero il premio che promuove i prodotti e progetti verdi ad altissimo contenuto di innovazione, in grado di ottenere prestazioni energetiche elevate con modalità e approcci nella massima tutela dei diritti dei consumatori, inoltre possiede la certificazione ANAB-ICEA.

3.2.1 Chiusure superiori: requisiti e prestazioni

Il tetto, sin dalla definizione delle prime tipologie abitative racchiude in sé la metafora dell'abitare, rappresenta l'elemento di protezione e riparo prodotto dall'uomo per contrastare gli effetti degli agenti atmosferici.

Secondo la norma UNI 8089 la copertura è “ *l'unità tecnologica avente la funzione di contribuire a realizzare una data situazione ambientale e d'uso a se stante a fronte di una data situazione ambientale e di uso esterno*”.

La funzione della copertura è quella di delimitare superiormente il sistema edilizio; l'elemento tecnico di chiusura può essere sia un elemento opaco che un infisso esterno orizzontale.

La funzionalità e l'aspetto formale della copertura sono caratterizzati da:

100. E' la più nota azienda produttrice di pannelli isolanti in lana di pecora, la ricerca della sostenibilità del prodotto edilizio ha portato questa azienda sarda ad incentivare la produzione di soluzioni coibentanti eco-sostenibili.



Figura 109. Pannello modulare coibentante in lana di pecora. Fonte : <http://www.edilana.com>



Figura 110. Pannello coibentante in lana posidonia. Fonte : <http://www.edilana.com>

1. l'insieme dei requisiti prestazionali tecnologici che devono garantire:
 - protezione dagli agenti atmosferici;
 - corretto comportamento termo-igrometrico ed acustico dell'elemento;
2. l'insieme degli elementi architettonici che la configurano, quali :
 - geometria dell'elemento tecnico;
 - rapporto tra elementi di chiusura verticale e condizioni esterne;
 - definizione di un elemento spaziale fruibile all'utente.

La geometria del tetto permette di distinguere la copertura in tetto a falda o tetto piano, il fattore di differenziazione è costituito dalla pendenza della copertura. L'inclinazione della falda è condizionata dal tipo di clima che interessa il sito e delle tradizioni locali; il criterio funzionale base che distingue le due tipologie è il rapido allontanamento delle precipitazioni meteoriche e nevose dall'elemento di chiusura superiore. In generale per climi mediamente piovosi e con modeste precipitazioni nevose il fattore di pendenza è pari al 35%, nei climi asciutti con poche precipitazioni si riduce la pendenza tenendo presente, come valore limite, l'indice del 30%.

Una progettazione non approfondita dell' inclinazione della falda può causare problemi di infiltrazioni d'acqua della stratigrafia di copertura sia per fenomeni di pioggia battente sia per ristagno d'acqua tra le sovrapposizioni e negli incastri degli elementi del manto. In relazione alla finitura del manto di chiusura è possibile fare

un'ulteriore distinzione tra coperture continue e discontinue: le prime si ottengono quando lo stato di superficie è composto da un unico elemento di grandi dimensioni (i materiali posti in opera possono essere metallici, plastici, ecc); mentre nel secondo caso i materiali impiegati per completare la copertura sono composti da singoli elementi di piccole dimensioni in laterizio, pietra, ecc.

Dal punto di vista della normativa esigenziale-prestazionale¹⁰¹ le classi di esigenza che devono essere soddisfatte dalle coperture sono: Sicurezza, Benessere, Gestione¹⁰²; ogni classe di esigenza esplica dei requisiti che rappresentano la trasposizione a livello tecnico delle esigenze, ovvero la richiesta rivolta ad un determinato elemento edilizio (spazio o ambiente o componente) di possedere caratteristiche di funzionamento tali da soddisfare determinate esigenze.

I requisiti essenziali per la copertura richiesti per la classe della **Sicurezza**¹⁰³ sono:

resistenza meccanica ai carichi statici, resistenza meccanica ai carichi dinamici, resistenza agli urti, resistenza all'abrasione
resistenza alle esplosioni, resistenza all'elettromagnetismo,
resistenza alle deformazioni, resistenza alle intrusioni,
resistenza al gelo, resistenza allo shock termico, stabilità dimensionale .

Per il **Benessere**¹⁰⁴ sono:

tenuta all'acqua, permeabilità all'aria, isolamento termico, inerzia termica, controllo condensa interstiziale, isolamento acustico, non rumorosità, non emissione di sostanze nocive, comfort tattile.

Per la classe di **Gestione**¹⁰⁵ si devono soddisfare i requisiti di :

contenimento dei consumi energetici, durabilità e manutenzione, economicità di dismissione.

STRAW_WIND Ventilated roof
Sviluppo e sperimentazione di un sistema/componete
per coperture ventilate ecosostenibili
prodotte dalla conversione "by products" della paglia

101. L'analisi esigenziale-prestazionale rappresenta la metodologia che la disciplina della TdA utilizza durante il processo edilizio con lo scopo di perseguire la qualità edilizia, le norme di riferimento sono la UNI 8289:1981 che individua 7 classi di esigenza : Sicurezza, Benessere, Gestione Aspetto, Fruibilità, Gestione, Integrabilità, Salvaguardia ambientale e la UNI 11277:2008 che rappresenta la norma da usare per la valutazione dell'ecocompatibilità negli interventi edilizi. Essa definisce esigenze e requisiti relativi all'ecocompatibilità dei progetti edilizi riferiti al ciclo di vita dell'edificio attraverso il benessere degli utenti finali e l'ecosostenibilità degli interventi. I due target di valutazione sono dunque: l'uomo e l'ambiente naturale; Le classi di esigenza secondo questa norma sono: il benessere, la salvaguardia dell'ambiente e l'utilizzo razionale delle risorse, che vengono articolate ognuna in esigenze, riferite a loro volta sia a specifiche fasi del ciclo di vita, sia a specifici requisiti, appositamente introdotti nella stessa norma (in tutto le esigenze introdotte sono diciotto).

102. Cfr. Arbizzani, E. (2011). *Tecnologia dei sistemi edilizi. Progetto e Costruzione*. Maggioli Editore, pag. 284

103. Insieme delle condizioni relative alla incolumità degli utenti, nonché alla difesa e prevenzione di danni in dipendenza da fattori accidentali, nell'esercizio del sistema edilizio.

104. Insieme delle condizioni relative a stati del sistema edilizio adeguati alla vita, alla salute ed allo svolgimento delle attività degli utenti

105. Insieme delle condizioni relative all'attitudine del sistema edilizio ad essere adeguatamente usato dagli utenti nello svolgimento delle attività.

La composizione e la dei diversi elementi che compongono la stratigrafia di copertura individua diversi modelli funzionali e diverse tipologie di copertura; in generale gli stati che compongono la chiusura superiore si distinguono in elementi principali e elementi complementari (tab.2), i primi hanno una funzione autonoma, cioè sono posti in opera per garantire il soddisfacimento dei requisiti; per i secondi la loro presenza nella stratigrafia di copertura è subordinata a specifiche ragioni tecniche che dipendono dalla tecnologie e dai materiali impiegati.

Fra gli elementi principali si distinguono :

1. **l'elemento di tenuta**, comprende il manto di copertura, lo strato di tenuta all'acqua, di tenuta all'aria, di barriera al vapore , di diffusione del vapore. Il manto di copertura serve a garantire l'impermeabilità all'acqua meteorica, la resistenza alle sollecitazioni fisiche, meccaniche e chimiche indotte dall'esterno e dall'uso, e si distingue in continuo o discontinuo a seconda che si impiegino come elementi di finitura guaine bituminose, fogli di alluminio,ecc.. (copertura continua) oppure si impieghino coppi, tegole, stuoie, paglia (copertura discontinua). Lo strato di barriera al vapore viene inserito sotto l'elemento termoisolante, immediatamente sopra la struttura portante, ed ha lo scopo di impedire il passaggio di vapore d'acqua nello strato termoisolante (consente di controllare il fenomeno della condensa all'interno della copertura); strato di tenuta all'aria e all'acqua.
2. **l'elemento isolante**, è composto da materiali termoisolanti e acustici, il primo ha il compito di verificare la trasmittanza termica dell'elemento di copertura; l'isolante acustico serve a controllare la

propagazione del rumore: infatti di solito il materiale isolante impiegato nelle coperture soddisfa sia la richiesta di isolamento termico che quella di isolamento acustico.

3. **L'elemento di resistenza**, ha lo scopo di supportare i carichi dovuti al peso proprio degli strati superiori e dei carichi di esercizio e dei sovraccarichi. La funzione di questo strato di questo strato viene generalmente assolta dagli elementi tecnici delle strutture portanti. Nelle coperture inclinate la tecnologia di realizzazione dello strato resistente può essere diversa rispetto alle strutture di elevazione verticali e orizzontali. Può assolvere alle funzioni di isolamento termico e acustico e generalmente assolve alle funzioni di inerzia termica.

Gli elementi complementari, come accennato sono quegli strati che possono essere impiegati in base alla tipologia di copertura, di seguito si riportano sono alcuni di questi:

1. **L'elemento di protezione**, può avere diversi scopi, se serve come protezione dal fuoco si compone di una barriera ignifuga realizzata per proteggere gli elementi tecnici che non possiedono le necessarie caratteristiche di resistenza e reazione al fuoco (solitamente si impiegano inerti opacchi in fibro-cemento o in cartongesso; se ha la funzione di rivestimento serve a proteggere dagli agenti atmosferici ma anche valenza estetica, inoltre assicura la durabilità nella copertura. Un esempio di strato di protezione è quello organico delle coperture verdi che oltre a garantire la protezione dei substrati inferiori ha anche lo scopo di ancorare la vegetazione posta sulla copertura. La vulnerabilità degli involucri di copertura è legata principalmente a due fattori:
 - esposizione agli agenti atmosferici;

STRAW_WIND Ventilated roof
Sviluppo e sperimentazione di un sistema/componente
per coperture ventilate ecosostenibili
prodotte dalla conversione "by products" della paglia

- intensità dei flussi energetici di scambio tra interno-esterno.

In questo elemento tecnico la differenza di temperatura è notevole, poiché le temperature di esercizio della copertura possono arrivare anche intorno agli 80°C; particolari condizioni di temperature e di umidità relativa possono alterare le prestazioni termiche dei prodotti isolanti ma anche l'intero funzionamento energetico del sistema di chiusura.

2. **lo strato di ventilazione**, che serve a regolarizzare il comportamento termo-igrometrico della copertura, e che consiste in un canale di ventilazione dallo spessore variabile in virtù della pendenza e della lunghezza della falda, della zona climatica.
3. **lo stato di pendenza**, serve a garantire che ci sia la giusta inclinazione per allontanare le acque meteoriche, nelle coperture a falda la geometria della falda assicura già di per sé la pendenza, nelle coperture piane si realizza lo strato delle pendenze su quello resistente.

3.2.2 Coibentare le coperture a falda

La copertura a falda è certamente la tipologia di copertura più diffusa in Italia infatti il 65% delle coperture realizzate ogni anno in Italia è a falde; per tale ragione è anche maggiormente interessata dagli interventi di coibentazione.

Nello specifico gli schemi funzionali delineati dalla norma UNI sono quattro schemi:

1. *copertura discontinua non isolata e non ventilata*, si usa principalmente per ambienti non riscaldati quali depositi e edifici industriali, in questa soluzione non si dispone di

nessun tipo di controllo sulla trasmittanza termica, quindi non viene controllata né la trasmissione del calore né l'isolamento termico.

2. *copertura discontinua non isolata e ventilata*

4. *copertura discontinua isolata*, detta anche “tetto caldo” in cui è previsto lo strato termoisolante, che viene posizionato sopra lo strato resistente contribuendo, ove questo sia realizzato con materiali pesanti, a promuovere il fenomeno della inerzia termica nel manufatto. Si impiegano inoltre la barriera al vapore o lo strato di diffusione, mentre è assente lo strato di ventilazione
5. *copertura discontinua isolata e ventilata*, detta anche “tetto freddo”, impiega sia lo strato termoisolante che una camera d'aria ventilata; la camera di ventilazione è posta al di sopra dello strato isolante ed è dimensionata secondo la norma UNI. Il dimensionamento del canale di ventilazione segue le disposizioni della norma UNI 9460/2008 “Coperture discontinue - Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione e la manutenzione di coperture realizzate con tegole di laterizio o calcestruzzo”; in linea generale la dimensione consigliata minima è cmq./ml. 550 massimo cmq./ml. 800.

A seconda della posizione dello strato isolante si possono avere tre soluzioni diverse:

- dall'esterno della copertura, mediante la posa in opera dell'isolante sull'estradosso della struttura portante del tetto (Fig. 111). La posa in opera di questa tecnologia di coibentazione è la più costosa, per poter posare lo strato coibente occorre realizzare un ponteggio intorno alla struttura, inoltre prevede che il materiale isolante sia posto direttamente sotto le tegole, quindi si devono adottare tutti gli accorgimenti utili a ridurre il surriscaldamento sotto tegola come lo strato di micro o macro ventilazione. L'isolante, viene posto sull'estradosso della falda, tra listelli di legno posati longitudinalmente nel senso della pendenza e a distanza di 50/60 cm l'uno dall'altro. I problemi legati a questa soluzione risiedono nell'eventuale presenza di ponti termici tra la listellatura e l'isolante; per tale ragione molti pannelli hanno elevata resistenza a compressione, che consente di evitare l'uso di questi listelli. Al di sopra dello strato isolante viene posta in opera una seconda orditura di listelli, perpendicolare alla prima, a sostegno del manto di copertura.

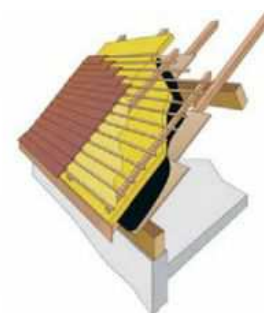


Figura 111. Coibentazione estradosso solaio di copertura

- dall'interno dell'intradosso di copertura, quando si applica l'isolante sull'intradosso dell'elemento portante (Fig 112). Nella fase di posa in opera questa soluzione non richiede l'installazione di un ponteggio quindi risulta una soluzione più economica e più pratica. In questa soluzione il materiale non è soggetto allo shock termico che interessa l'applicazione d'estradosso, ma affinché il materiale coibente conservi nel tempo le sue caratteristiche e che quindi non sia interessato dalla degradabilità, è fondamentale evitare la formazione di condensa interstiziale²⁹. Per garantire buone prestazioni termica nei mesi caldi si devono preferire dei materiali dotati di una buona inerzia

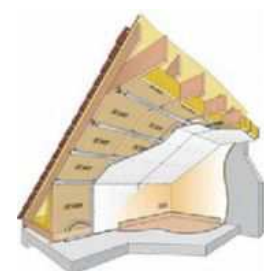


Figura 112. Coibentazione intradosso solaio di copertura

termica come ad esempio la fibra di legno, la canapa, ecc ; l'alta massa volumica e superficiale infatti consente di rallentare l'ingresso del calore dall'esterno. Poiché questa soluzione tecnologica prevede l'applicazione di prodotto in sottotetti abitati è possibile rifinire lo strato di coibentazione con pannelli in cartongesso, perlinatura, ecc.

- dall'interno dell'estradosso dell'ultima soletta di copertura anche in questo caso l'isolante non è esposto agli agenti atmosferici, per cui si interviene applicando l'isolante all'interno dello spazio sottotetto (Fig 113)



Figura 113. Coibentazione estradosso dell'ultimo solaio di copertura

3.2.3 Coibentare le coperture piane

Le coperture piane sono caratterizzate da una pendenza che va un minimo di 1 % per le coperture praticabili, fino a un massimo del 5% di pendenza. Gli elementi che compongono la stratigrafia della chiusura orizzontale piana sono:

- l'isolamento termo-acustico,
- l'impermeabilizzazione,
- di protezione,
- il piano di calpestio per le coperture praticabili

La combinazione degli strati definisce diversi livelli di complessità e accessibilità; in base all'accessibilità le coperture si distinguono in:

- accessibili per la manutenzione;
- accessibili ai pedoni;
- accessibili ai veicoli;
- giardino pensile;

Nella progettazione di una copertura piana occorre tener presente alcuni fattori che possono compromettere la prestazione della chiusura orizzontale, quali :

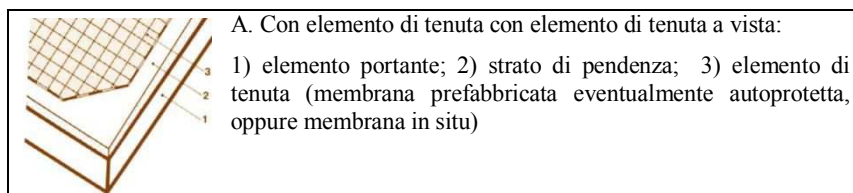
- esposizione prolungata al calore
- elevata temperatura
- variazioni termiche repentine
- variazioni dimensionali differenziali
- sollecitazioni meccaniche
- azioni chimiche (raggi ultravioletti)

Nella progettazione dei tetti piani bisogna prestare particolare attenzione e quindi adottare le seguenti procedure:

- a) la scelta di un materiale congruo alla sopportazione dei carichi agenti e alle condizioni climatiche e stratigrafiche presenti;
- b) eseguire un'accurata posa degli elementi di tenuta all'acqua e all'aria.

Dal punto di vista funzionale le tipologie costruttive dei tetti piani sono distinte in:

• **Copertura continua non isolata.** E' usata principalmente per grandi spazi non riscaldati, in cui la mancanza dello strato isolante espone lo strato resistente a sollecitazioni termiche che possono indurre dilatazioni termiche notevoli.

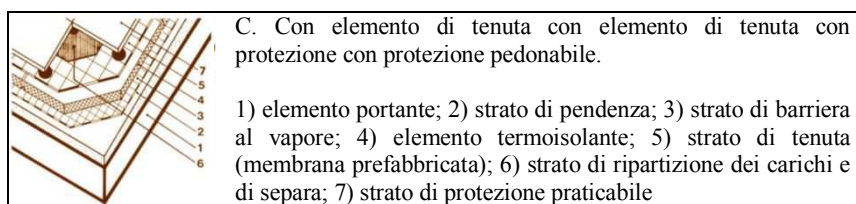


	<p>B. Con elemento di tenuta con elemento di tenuta con protezione pesante (ghiaia)</p> <p>1) elemento portante; 2) strato di pendenza; 3) strato di separazione e/o scorrimento; 4) elemento di tenuta (membrana prefabbricata o membrana in situ); 5) strato di protezione pesante (ghiaia)</p>
	<p>C. Con elemento di tenuta con elemento di tenuta con protezione con protezione pedonabile.</p> <p>1) elemento portante 2) strato di pendenza 3) elemento di tenuta (membrana prefabbricata o membrana in situ) 4) strato di ripartizione dei carichi e di separazione 5) strato di protezione pedonabile</p>
	<p>D. Con elemento di tenuta con elemento di tenuta con protezione carrabile (massetto in cls armato):</p> <p>1) elemento portante 2) strato di pendenza 3) elemento di tenuta (membrana prefabbricata o membrana in situ) 4) strato di separazione e/o scorrimento 5) strato di protezione carrabile</p>
<p>Figura 114. Soluzioni tecnologiche Fonte: http://icba.altervista.org/FILES/8B_COPc.PDF</p>	

• **Copertura continua isolata “tetto Caldo”.** Questo tipo di copertura assicura il benessere termo-igrometrico ed acustico della copertura; l'uso dello strato isolante preserva la struttura portante dagli eccessivi sbalzi termici.

	<p>A. Con elemento di tenuta con elemento di tenuta a vista:</p> <p>1) elemento portante; 2) strato di pendenza; 3) strato di barriera al vapore; 4) elemento termoisolante; 5) strato di tenuta (membrana prefabbricata)</p>
	<p>B. Con elemento di tenuta con elemento di tenuta con protezione pesante (ghiaia)</p> <p>1) elemento portante; 2) strato di pendenza; 3) strato di barriera al vapore; 4) elemento termoisolante; 5) strato di tenuta (membrana prefabbricata); 6) strato di separazione e/o scorrimento; 7) strato di protezione pesante (ghiaia)</p>

STRAW_WIND *Ventilated roof*
Sviluppo e sperimentazione di un sistema/componete
per coperture ventilate ecosostenibili
prodotte dalla conversione “by products” della paglia



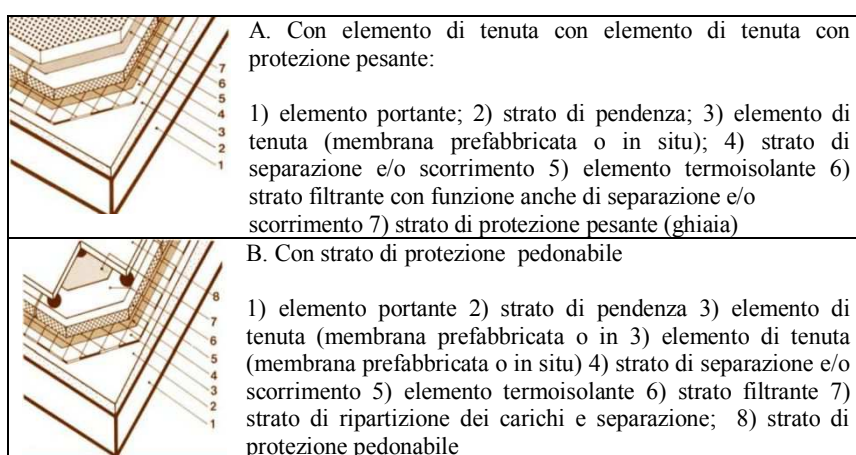
C. Con elemento di tenuta con elemento di tenuta con protezione con protezione pedonabile.

1) elemento portante; 2) strato di pendenza; 3) strato di barriera al vapore; 4) elemento termoisolante; 5) strato di tenuta (membrana prefabbricata); 6) strato di ripartizione dei carichi e di separa; 7) strato di protezione praticabile

Figura 115. Soluzioni tecnologiche

Fonte:http://icba.altervista.org/FILES/8B_COPc.PDF

• **Copertura isolata rovescia “tetto freddo”.** In questa soluzione lo strato termo isolante è posto al di sopra della membrana impermeabilizzante.



A. Con elemento di tenuta con elemento di tenuta con protezione pesante:

1) elemento portante; 2) strato di pendenza; 3) elemento di tenuta (membrana prefabbricata o in situ); 4) strato di separazione e/o scorrimento 5) elemento termoisolante 6) strato filtrante con funzione anche di separazione e/o scorrimento 7) strato di protezione pesante (ghiaia)

B. Con strato di protezione pedonabile

1) elemento portante 2) strato di pendenza 3) elemento di tenuta (membrana prefabbricata o in situ) 4) strato di separazione e/o scorrimento 5) elemento termoisolante 6) strato filtrante 7) strato di ripartizione dei carichi e separazione; 8) strato di protezione pedonabile

Figura 116. Soluzioni tecnologiche

Fonte:http://icba.altervista.org/FILES/8B_COPc.PDF

• Copertura isolata non ventilata “tetto sandwich”,

l' elemento di tenuta viene interposto tra due tra due elementi termoisolanti elementi, questo modello funzionale rappresenta una evoluzione delle coperture isolate a tetto “freddo” (o rovescio) e “a caldo”; si dotta questa soluzione quando sono richieste elevate prestazioni termiche in ambienti esposti a climi estremi, inoltre è

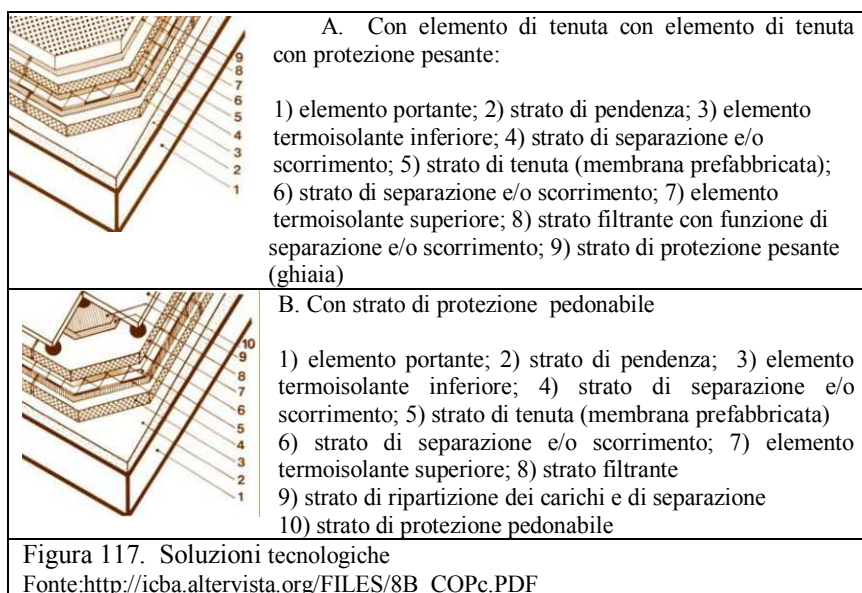
STRAW_WIND *Ventilated roof*

Sviluppo e sperimentazione di un sistema/componete

per coperture ventilate ecosostenibili

prodotte dalla conversione “by products” della paglia

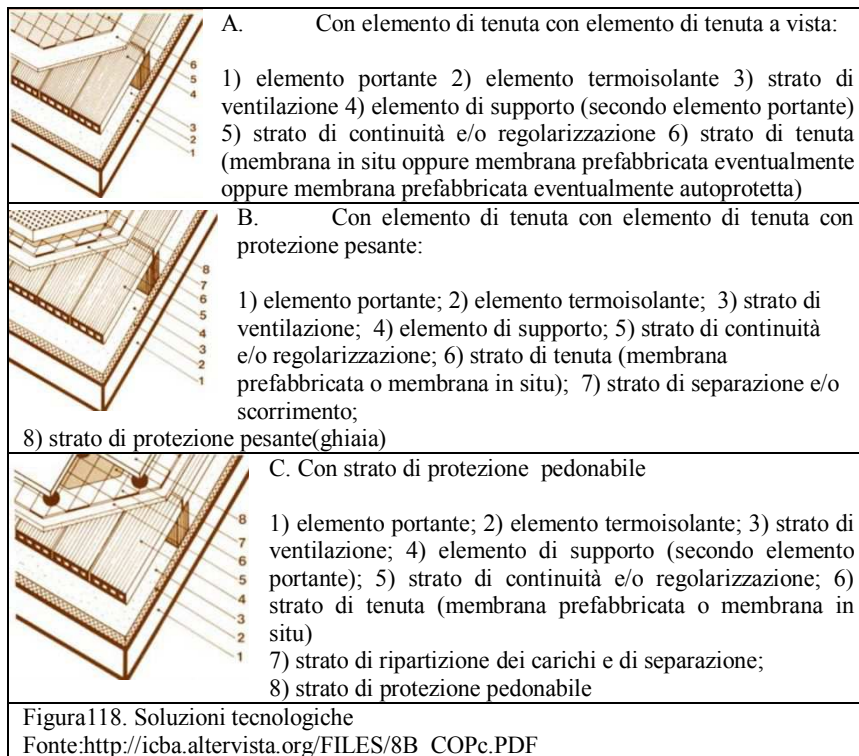
un'ottima soluzione per ripristinare le coperture esistenti realizzate in origine come tetto caldo.



• **Copertura isolata e ventilata.** Come per le coperture inclinate anche nelle coperture orizzontali è possibile impiegare uno strato di ventilazione; nello specifico lo strato di ventilazione è posto tra lo strato termico inferiore e la membrana di tenuta.

Nei tetti piani tradizionali l'isolamento termico, poiché è sensibile all'acqua ed all'umidità, viene collocato al di sotto dello strato impermeabile. Questo tipo di soluzione presenta alcuni inconvenienti, la variazione di temperatura nello strato impermeabile per azione delle escursioni termiche giornaliere e stagionali, nonché gli sbalzi improvvisi di temperatura (pioggia improvvisa) riducono la durabilità dello strato isolante. Inoltre anche il cattivo funzionamento della barriera al vapore (sottostante l'isolante termico) può provare la

condensazione di vapore acqueo, con conseguente perdita delle proprietà dell'isolamento termico.



Gli schemi funzionali riportati nel paragrafo 3.2.3 considerano sempre la posa in opera dell'isolamento dall'esterno, tuttavia anche per le coperture piane si può ricorrere all'uso dell'isolante nell'intradosso dell'elemento strutturale

3.2.4 Ventilazione : i vantaggi energetici.

La ventilazione è garantita mediante la progettazione del canale di aereazione, il tetto ventilato viene individuato dalla norma UNI 8627 - Sistemi di copertura - Definizione e classificazione degli schemi funzionali, soluzioni conformi e soluzioni tecnologiche - definisce una stratigrafia composta sia da uno stato isolante che da un canale di ventilazione. Il riferimento normativo da seguire se si intende realizzare una copertura ventilata è la Norme UNI 9460, i concetti basilari della norma sono:

- a) la camera di ventilazione, fra manto in coppi e strato coibente, deve essere non inferiore a $550 \text{ cm}^2/\text{m}$ di larghezza della falda, perché solo con tale dimensione dell'intercapedine l'aria calda è in grado di attivare i moti convettivi ascensionali;
- b) non sono compatibili listellature o altri impedimenti che attraversando la falda possono intralciare il flusso ascensionale dell'aria riscaldata;
- c) l'aria esterna deve entrare nella camera di ventilazione, a livello di gronda, in modo facile e, soprattutto, deve uscire dal colmo attraverso un elemento di "sfiato", adeguato a garantire il deflusso dell'aria riscaldata in quantità almeno pari a quella di entrata. In generale i vantaggi che possono essere introdotti con la ventilazione sono :

- smaltimento del vapor d'acqua nell'elemento di copertura nel periodo invernale;
- asciugatura di eventuali infiltrazioni d'acqua o condense;
- prevenzione della formazione di condensa nello stato sottotegola quando il tetto è ricoperto dalla neve;
- riduzione del flusso termico nel periodo estivo.

Il flusso termico nel periodo estivo dipende principalmente dall'irraggiamento solare, quindi la valutazione di questo dato deve essere fatta in funzione della zona climatica in cui si trova la copertura. La riduzione del flusso di calore è in funzione dell'altezza del canale di ventilazione (Fig 119). Alcuni fonti bibliografiche legano la dimensione del canale di ventilazione alla geometria della falda (si riportano i valori indicativi sono riportati nella tabella 3); tuttavia occorre ricordare che lo strato di ventilazione interessa anche la copertura piana. Nella tipologia "tetto piano" lo strato di ventilazione viene collocato all'interno delle stratificazioni funzionali costituente la soluzione conforme (Fig 120); l'attivazione del flusso convettivo della ventilazione dipende da fenomeni di sovrappressione dovuti al vuoto, quindi non sempre tale condizione si verifica in modo naturale. Affinchè una copertura piana possa rendere efficace lo strato di ventilazione si predispongono degli impianti meccanici che possono garantire la presenza del flusso d'aria.

Lunghezza della falda in m	Pendenza della falda in %				
	18	26	36	46	57
$L \leq 5$	5	5	5	5	5
$5 < L \leq 10$	8	6	5	5	5
$10 < L \leq 15$	10	8	6	5	5
$15 < L \leq 20$	10	10	8	6	5
$L > 20$	10	10	10	8	6

Tabella 3 . Spessore intercapedine in cm in rapporto alla lunghezza della falda e alla sua pendenza. Fonte: Paolino, L., (2013). Il sistema tetto : progettazione, comportamento e realizzazione delle coperture degli edifici, Maggioli Editore, Rimini

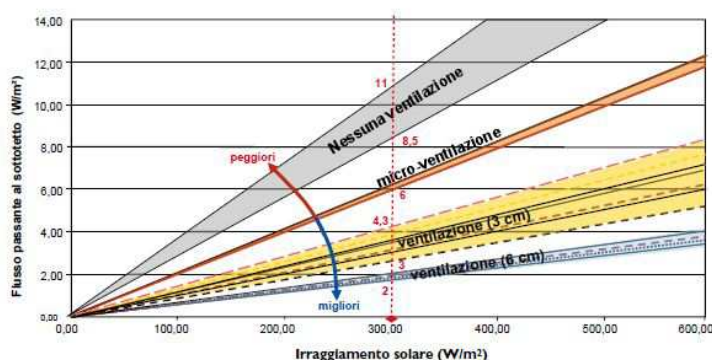
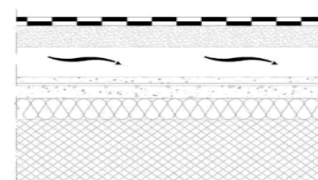


Figura 119. Rapporto pendenza falda e flusso di calore in base all'altezza del canale di ventilazione

Il comportamento delle coperture a falde invece garantisce sempre la presenza della ventilazione; a seconda dell'escursione, estate/inverno e giorno/notte nell'intercapedine si generano costantemente le condizioni atte a produrre l'effetto camino¹⁰⁶ e l'effetto vento¹⁰⁷. Il comportamento termico dell'intercapedine sfrutta la combinazione di questi due effetti sviluppando una differenza di pressione tra la sezione d'entrata posta nell'estremità inferiore della falda e quella di

106. Tale effetto si fonda sulla differenza di temperatura tra l'aria esterna e l'aria interna. L'aria all'interno dell'intercapedine ha una temperatura maggiore rispetto a quella dell'aria esterna, infatti è stata riscaldata dal calore ceduto per irraggiamento. La minore densità dell'aria tenderà far salire il flusso più caldo verso il colmo, l'aria uscente dall'estremo superiore della falda produce una depressione alla base dell'intercapedine che quindi attira aria esterna più fresca.

107. In questo caso è la differenza di pressione del vento tra la sezione di entrata dell'aria e quella di uscita a generare il movimento dell'aria. La pressione del vento in uno specifico punto dell'involucro di un edificio dipende dalla velocità del vento e da un coefficiente che caratterizza quel particolare punto.

uscita posta nella parte superiore della falda. In base alla velocità del vento nella sezione ci sarà una maggiore predominanza dell'effetto camino oppure dell'effetto vento; cioè a velocità limitata, predomina l'effetto camino, mentre a velocità alta predominante l'effetto del vento. Altri fattori che influenzano il funzionamento della ventilazione sono:

- la comunicazione del canale d'areazione con il sotto- tegola;
- conformazioni delle sezioni d'ingresso e uscita (tab.15-16)
- condizioni ambientali esterne;
- presenza di venti dominanti e loro frequenza ed intensità;
- esposizione delle falde ai venti.

La micro ventilazione sotto tegola può essere predisposta anche mediante l'uso di coppi speciali (Fig. 121). La posa in opera di questi elementi avviene inserendo il singolo pezzo speciale ad intervalli regolari ogni 3 oppure ogni 6 tegole a seconda delle caratteristiche del tetto, della tipologia del manto e delle condizioni climatiche del contesto. In termini di bilancio energetico della copertura ventilata i flussi che entrano in azione nel periodo estivo sono i flussi di calore che per irraggiamento¹⁰⁸ che colpiscono la superficie del manto di copertura (Q_{so}) per poter calcolare il valore del flusso in uscita occorre usare la seguente formula:

$$Q_v = m \cdot c_p \cdot (T_{out} - T_{int})$$

dove i termini sono rispettivamente :

flusso di ventilazione che fuoriesce dalla falda (Q_v)

portata di massa dell'aria che attraversa l'intercapedine (m)

calore specifico dell'aria a pressione costante (c_p)

temperature interne ed esterne ($T_{out} - T_{int}$).

3.3 L'efficienza termica delle coperture

Nel quadro delle normative di riferimento delle coperture oltre alle norme UNI 8090, 8091 che definiscono la terminologia e la geometria delle coperture, altre norme sono atte a definire le principali caratteristiche dei materiali utilizzati nei tetti; in modo

Lunghezza della falda in m	Pendenza della falda in %				
	18	26	36	46	57
$L \leq 5$	50	49	48	46	42
$5 < L \leq 10$	100	98	96	92	84
$10 < L \leq 15$	150	147	144	138	126
$15 < L \leq 20$	200	196	192	184	168
$L > 20$	250	245	240	230	210

Lunghezza della falda in m	Pendenza della falda in %				
	18	26	36	46	57
$L \leq 5$	60	59	58	56	52
$5 < L \leq 10$	120	118	116	112	104
$10 < L \leq 15$	180	177	174	168	156
$15 < L \leq 20$	240	236	232	224	208
$L > 20$	300	295	290	280	260

Tabella 15-16. Sezione minima colmo e di gronda fonte : il sistema tetto Paolino.

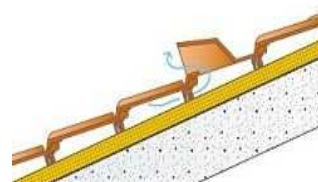


Figura 121. Colmo di areazione

108. E' uno dei meccanismi di trasmissione dell'energia come calore. in questo caso l'irraggiamento si riferisce alla radiazione solare che scalda la superficie esterna del manto di copertura.

particolare occorre soffermarsi sul tipo di isolante impiegato nella stratigrafia. La norma UNI EN ISO 10456 specifica i metodi per la determinazione dei valori termici dichiarati e di progetto per materiali e prodotti per l'edilizia che siano termicamente omogenei. UNI EN ISO 13788 Prestazione igrotermica dei componenti e degli elementi per edilizia - Temperatura superficiale interna per evitare l'umidità superficiale critica e la condensazione interstiziale - Metodi di calcolo. EN ISO 13786:2008 Prestazione termica dei componenti per edilizia – Caratteristiche termiche dinamiche

109. Decreto 26 giugno 2015- G.U.

Per analizzare il comportamento termico delle coperture è fondamentale porre attenzione ad alcuni valori; occorre infatti verificare le caratteristiche termiche in regime stazionario e in regime dinamico, al fine di valutare il comportamento dell'involucro nel periodo estivo e nel periodo invernale.

Regime stazionario	Regime variabile
Condizioni di progetto invernale	Condizioni di progetto estivo
trasmittanza termica	capacità termica sfasamento temporale smorzamento

Gli ultimi decreti attuativi¹⁰⁹ della Legge 90/1324 (entrati in vigore il 1 ottobre 2015), stabiliscono dei nuovi livelli minimi di classificazione degli edifici sulla base dell'indice di prestazione energetica globale non rinnovabile EP_{gl}, nren e dei nuovi valori di trasmittanza termica, nello specifico si sono ampliate le classi energetiche da 7 classi si è passati a 10 (Fig.33) e si sono imposti dei nuovi limiti di trasmittanza per dei componenti d'involucro dell'edificio, quali coperture, pareti, pavimenti, più restrittivi delle disposizioni della D. M. 26 Gennaio 2010 (Tab.17).

	A	B	C	D	E	F
Limiti D.M. 2010	0,38	0,38	0,38	0,32	0,30	0,29
Legge 90/13	0,38	0,38	0,36	0,30	0,25	0,23
Limiti 2015						
Legge 90/13						
0,35		0,35	0,33	0,26	0,22	0,20
Limiti 2021						

Tabella 17. valori di U max delle strutture opache orizzontali o a falda di edifici da riqualificare coperture in base alla zona climatica

La classificazione degli indici è fatta in funzione della zona climatica¹¹⁰(Fig. 122) in cui l'edificio è collocato.

I metodi di calcolo della trasmittanza e della resistenza termica dei componenti sono riportati nella norma UNI EN ISO 6946.

Secondo il decreto legislativo 192/05¹¹¹ per valutare le prestazioni energetiche delle chiusure superiori è fondamentale la verifica del comportamento dell'edificio anche durante la stagione estiva.

I valori da verificare sono :

- la trasmittanza termica periodica (YIE)
- la prestazione energetica per il raffrescamento estivo dell'involucro (Epe,invol).

La trasmittanza periodica è calcolata secondo le disposizioni della UNI EN ISO 13786, e si ottiene dalla seguente relazione:

$YIE = U \cdot fa$

dove: U corrisponde alla trasmittanza termica in regime stazionario
fa è il fattore di attenuazione¹¹²

n. 162 del 15 luglio 2015.

	Classe A4	$\leq 0,40 EP_{gl,nr,Lst(2019/21)}$
$0,40 EP_{gl,nr,Lst(2019/21)} <$	Classe A3	$\leq 0,60 EP_{gl,nr,Lst(2019/21)}$
$0,60 EP_{gl,nr,Lst(2019/21)} <$	Classe A2	$\leq 0,80 EP_{gl,nr,Lst(2019/21)}$
$0,80 EP_{gl,nr,Lst(2019/21)} <$	Classe A1	$\leq 1,00 EP_{gl,nr,Lst(2019/21)}$
$1,00 EP_{gl,nr,Lst(2019/21)} <$	Classe B	$\leq 1,20 EP_{gl,nr,Lst(2019/21)}$
$1,20 EP_{gl,nr,Lst(2019/21)} <$	Classe C	$\leq 1,50 EP_{gl,nr,Lst(2019/21)}$
$1,50 EP_{gl,nr,Lst(2019/21)} <$	Classe D	$\leq 2,00 EP_{gl,nr,Lst(2019/21)}$
$2,00 EP_{gl,nr,Lst(2019/21)} <$	Classe E	$\leq 2,60 EP_{gl,nr,Lst(2019/21)}$
$2,60 EP_{gl,nr,Lst(2019/21)} <$	Classe F	$\leq 3,50 EP_{gl,nr,Lst(2019/21)}$
	Classe G	$> 3,50 EP_{gl,nr,Lst(2019/21)}$

110. La distinzione in zone climatiche si ottiene dividendo il territorio in base al parametro del grado giorno (GG), che permettono di caratterizzare i climi italiani in base all'andamento della temperatura dell'aria esterna durante il periodo di riscaldamento

111. Successivamente modificato dal d.lgs. n. 311/06, dal DPR n. 59/09, dal DL 63/13 e dalla Legge n. 90/13.



Figura 122. Classificazione territorio Italiano in zone climatiche.

112. Esprime il rapporto tra la variazione massima della temperatura esterna ΔT_e e quella della temperatura interna ΔT_i in riferimento alla temperatura media della superficie interna.

Lo sfasamento¹¹³ è essenziale nel periodo estivo, perché si traduce nella capacità di rilasciare il calore immagazzinato dal materiale isolante all'ambiente sottostante; Sfasamento e smorzamento dipendono anche dalla diffusività termica¹¹⁴, ovvero il valore ottenuto dal rapporto tra la capacità che ha un materiale di condurre energia termica del materiale e la sua capacità di accumularne.

Essa si calcola con la seguente formula:

$$d = \lambda / \rho c$$

dove : λ è conducibilità termica del materiale

ρ è densità

c è il calore specifico¹¹⁵ unitario

I materiali isolanti dotati di un alta capacità termica massica¹¹⁶ sono quelli più indicati per svolgere questa funzione. Il parametro del calore specifico del materiale è quello che consente di scegliere in modo più appropriato il materiale isolante; in linea generale tra un materiale sintetico e un materiale in fibra naturale il secondo è da preferirsi al primo poiché presenta delle prestazioni migliori.

Oltre a verificare i parametri termici, stazionari e/o dinamici, un altro fattore che può influenzare la scelta degli isolanti è la traspirabilità della struttura. Con una buona traspirabilità del materiale isolante si garantisce lo scambio di aria e vapore acqueo tra l'ambiente esterno e quello interno. Inoltre, una maggiore traspirabilità del prodotto ne determina una maggiore durabilità.

La traspirazione permette poi anche un migliore isolamento termico: infatti la presenza di acqua liquida (vapore condensato) altera le proprietà di isolamento termico sia dell'aria stagnante che dei materiali coibenti posati nella struttura. In conclusione, i criteri di scelta in particolare per applicazioni di copertura possono essere racchiusi nei seguenti punti:

1. La capacità d'isolamento termico;

113. E' la differenza di tempo che intercorre tra l'ora in cui si ha la massima temperatura all'esterno e l'ora in cui si ha la massima temperatura all'interno, e non deve essere inferiore alle 8/12 ore;

114. Misura la velocità di propagazione del flusso termico conduttivo causato dalla variazione nel tempo della temperatura. Minore risulta la diffusività tanto migliori saranno le sue prestazioni in termini di attenuazione e sfasamento dell'onda termica.

115. si definisce come il valore della quantità calorica in Joule, che 1 kg di materia assorbe o emana, quando la sua temperatura viene alzata o abbassata di un grado K (Kelvin). E' legata alla densità del materiale (più è denso più è alta la capacità termica)

116. Corrisponde alla quantità di calore da fornire, a pressione costante, all'unità di massa del materiale per ottenere un aumento unitario di temperatura, esprime la capacità di un materiale di trattenere e accumulare calore.

2. L'inerzia termica o massa termica che è il parametro da osservare per soddisfare l'isolamento estivo e lo sfasamento del flusso di calore estivo;
3. La permeabilità al vapore (traspirabilità);
4. L'assorbimento all'acqua (perdita delle caratteristiche di isolamento con l'umidità);
5. La resistenza alla compressione;
6. Il comportamento al fuoco (contenuto di prodotti chimici dannosi per la salute);
7. L'emissione di CO₂ durante la produzione (prodotto biologico, possibilità di riciclo in caso di smaltimento).

3.3 Normativa tecnica coibentanti

La coibentazione riveste un ruolo rilevante per raggiungere i criteri dell'efficienza energetica di un'abitazione; in linea generale tutti i materiali coibentanti devono essere conformi alle disposizioni della Direttiva Europea 2002/91/Ce. La norma UNI 10351 indica le caratteristiche termiche da considerare quando si considerano i materiali isolanti:

- densità del materiale secco ρ viene espressa in kg/m³ rappresenta il rapporto tra la massa, e l'estensione su cui essa si distribuisce ed legata al peso del materiale e alla resistenza a compressione;
- permeabilità al vapore acqueo (δ) misura la quantità di vapore che attraversa lo spessore di 1 metro di un certo materiale su una superficie di 1 m² e per una differenza unitaria di pressione di vapore, si esprime in [kg/(mPa)];
- conduttività termica indicativa di riferimento λ_m [W/(mK)];
- maggiorazione percentuale m [%]:
tiene conto del contenuto di umidità in condizioni medie di esercizio, dell'invecchiamento, della manipolazione e dell'installazione;
- conduttività termica utile di calcolo λ [W/(mK)]:
ricavata applicando la maggiorazione m alla conduttività di riferimento λ_m .

Gli isolanti termici nello specifico devono garantire il comfort ambientale che è una prerogativa degli interventi per l'efficienza energetica degli edifici, atti a migliorare la qualità della vita dell'unità abitativa. Le principali peculiarità dei materiali coibentanti sono:

- La durabilità: il prodotto deve mantenere invariate nel tempo le sue caratteristiche.
- La stabilità strutturale sotto l'azione di sbalzi termici;
- La ridotta permeabilità al vapore d'acqua;
- L'imputrescibilità e l'inattaccabilità da parte di batteri e insetti;
- La ridotta capacità di assorbimento di acqua
- L'incombustibilità o almeno autoestinguibilità
- La resistenza meccanica.

Generalmente si considerano buoni isolanti termici i materiali porosi¹¹⁷ (alveolari) e fibrosi¹¹⁸, ovvero quei materiali che racchiudono l'aria e hanno una conduttività termica¹¹⁹ di 0,5 W/m K. La conducibilità dipende dalla natura del materiale e non dalla sua forma, i fattori che possono influenzare il valore della conducibilità sono:

- la densità del materiale¹²⁰;
- la porosità;
- il diametro e della lunghezza delle fibre (per i materiali fibrosi),
- il tenore igrometrico del materiale (contenuto di umidità in peso o volume).

Si riporta di seguito alcune norme di riferimento per i materiali isolanti:

UNI EN 823:2013. Isolanti termici per edilizia. Determinazione dello spessore

UNI EN 826:2013 .Isolanti termici per edilizia - Determinazione del comportamento a compressione

117. La porosità di un materiale è definita come rapporto fra il volume non occupato dalle parti solide e il volume totale. Nei materiali isolanti la porosità assume valori superiori a 0,9.

118. Le fibre costituiscono un reticolo che trattiene l'aria calda impedendo la convezione. L'impiego di fibre a bassa conduzione termica, offrono ottime condizioni di isolamento termico. La porosità irregolare della fibra inoltre realizza un'ottima fono-assorbenza, quindi tale tipo di materiale garantisce anche delle buone prestazioni acustiche

119. E' un grandezza fisica che esprime il flusso termico di scambio, ovvero la quantità di calore che attraversa un superficie soggetta a una differenza di temperatura di 1 grado Kelvin.(minore è la sua conduttività termica maggiore è il potere isolante del materiale, il miglior materiale isolante è l'aria $\lambda = 0.024$ W/mK)

120. Nei materiali densi il comportamento nei confronti della trasmissione del calore è omogeneo, il flusso di energia si propaga quasi esclusivamente per conduzione.

UNI EN 12086:2013. Isolanti termici per edilizia - Determinazione delle proprietà di trasmissione del vapore acqueo

UNI EN 12088:2013. Isolanti termici per edilizia - Determinazione dell'assorbimento d'acqua per diffusione per lungo periodo

UNI EN 1603:2013. Isolanti termici per edilizia - Determinazione della stabilità dimensionale in condizioni costanti e normali di laboratorio (temperatura 23 °C/umidità relativa 50%)

UNI EN 1604:2013. Isolanti termici per edilizia - Determinazione della stabilità dimensionale in condizioni specificate di umidità e di temperatura

UNI EN 1605:2013. Isolanti termici per edilizia - Determinazione della deformazione in condizioni specificate di carico di compressione e di temperatura

UNI EN 1605:2013. Isolanti termici per edilizia - Determinazione dell'assorbimento d'acqua per breve periodo per immersione parziale

UNI 5958 :1985 Prodotti di fibre minerali per isolamento termico ed acustico. Termini e definizioni.

UNI 6262 :1968 Prodotti di fibre di vetro per isolamento termico ed acustico. Feltri trapuntati. Tolleranze dimensionali e relative determinazioni.

UNI 6263 :1968 Prodotti di fibre di vetro per isolamento termico ed acustico. Feltri non trapuntati. Tolleranze dimensionali e relative determinazioni.

UNI 6264 :1968 Prodotti di fibre di vetro per isolamento termico ed acustico. Feltri resinati. Tolleranze dimensionali e relative determinazioni.

UNI 6485 :1969 Prodotti di fibre di vetro per isolamento termico ed acustico. Feltri resinati e pannelli. Determinazione della densità apparente.

UNI 6536 :1969 Prodotti di fibre di vetro per isolamento termico ed acustico. Fibre, feltri, pannelli e cospelle. Determinazione della perdita al fuoco.

UNI 6539 :1969 Prodotti di fibre di vetro per isolamento termico ed acustico. Veli. Determinazione della massa dell'unità di superficie.

UNI 6540 :1969 Prodotti di fibre di vetro per isolamento termico ed acustico. Veli. Determinazione del carico di rottura e trazione.

UNI 6541 :1969 Prodotti di fibre di vetro per isolamento termico ed acustico. Pannelli. Determinazioni delle caratteristiche di compressione.

UNI 6542 :1969 Prodotti di fibre di vetro per isolamento termico ed acustico. Feltri resinati, pannelli e cospelle. Determinazione delle imbibizioni per capillarità.

STRAW_WIND *Ventilated roof*

Sviluppo e sperimentazione di un sistema/componete

per coperture ventilate ecosostenibili

partendo dalla conversione "by products" della paglia

UNI 6543 :1969 Prodotti di fibre di vetro per isolamento termico ed acustico. Feltri resinati, pannelli e coppelle. Determinazioni dell'igroscopicità.

UNI 6544 :1969 Prodotti di fibre di vetro per isolamento termico ed acustico. Pannelli e feltri resinati. Determinazione dell'indice di trazione. Metodo dell'anello.

UNI 6547 :1985 Pannelli di fibre minerali per isolamento termico ed acustico. Determinazione del grado di flessibilità.

UNI 6665 :1988 Superfici coibentate. Metodi di misurazione.

UNI 6718 :1970 Prodotti e fibre di vetro per isolamento termico ed acustico. Determinazione della resistenza al passaggio dell'aria dei veli di fibre di vetro.

UNI 7745 :1977 Materiali isolanti. Determinazione della conduttività termica con il metodo della piastra calda con anello di guardia.

UNI 7819 :1988 (ISO 4898) Materie plastiche cellulari rigide. Polistirene espanso in lastre per isolamento termico. Tipi, requisiti e prove. (FA 1-92)

UNI 7891 :1978 Materiali isolanti. Determinazione della conduttività termica con il metodo dei termoflussimetri. (FA 113-83)

UNI 9110 :1987 Determinazione della resistenza termica di materiali o prodotti isolanti fibrosi comprimibili.

UNI 9233 :1988 Determinazione delle proprietà di trasmissione del vapore acqueo di materiali da costruzione ed isolanti termici.

UNI 10522 :1996 Prodotti di fibre minerali per isolamento termico e acustico. Fibre, feltri, pannelli e coppelle. Determinazione del contenuto di sostanze volatili.

UNI 10523 :1996 Prodotti a base di fibre minerali. Prelievo e trattamento dei campioni.

UNI EN 826 : Isolanti termici per edilizia. Determinazione del comportamento a compressione.

UNI ISO 2509 :1993 Agglomerati espansi puri di sughero assorbenti acustici in piastrelle.

ISO 7345 :1987 Thermal insulation. Physical quantities and definitions.

ISO 8142 :1990 Thermal insulation. Bonded preformed man-made mineral fibre pipe sections. Specification.

ISO 8144/1 :1995 Thermal insulation. Mineral wool mats for ventilated roof spaces. Part 1: Specification for applications with restricted ventilation.

STRAW_WIND *Ventilated roof*

Sviluppo e sperimentazione di un sistema/componente

per coperture ventilate ecosostenibili

partendo dalla conversione "by products" della paglia

ISO 8144/2 :1995 Thermal insulation. Mineral wool mats for ventilated roof spaces. Part 2: Specification for horizontal applications with unrestricted ventilation.

ISO 8145 :1994 Thermal insulation. Mineral wool board for overdeck insulation of roofs. Specification.

ISO 8301 :1991 Thermal insulation. Determination of steady-state thermal resistance and related properties. Heat flow meter apparatus.

ISO 8302 :1991 Thermal insulation. Determination of steady-state thermal resistance and related properties. Guarded hot plate apparatus.

ISO 8497 :1994 Thermal insulation. Determination of steady-state thermal transmission properties of thermal insulation for circular pipes.

ISO 8990 :1994 Thermal insulation. Determination of steady-state thermal transmission properties. Calibrated and guarded hot box.

ISO 9251 :1987 Thermal insulation. Heat transfer conditions and properties of materials. Vocabulary.

ISO 9288 :1989 Thermal insulation. Heat transfer by radiation. Physical quantities and definitions.

ISO 9346 :1987 Thermal insulation. Mass transfer. Physical quantities and definitions.

ISO 10051 :1996 Thermal insulation. Moisture effects on heat transfer. Determination of thermal transmissivity of a moist material.

UNI EN ISO 9229:2008 Isolamento termico – Terminologia.

ISO 9774:2004 Thermal insulation for building applications – Guidelines for selecting properties.

UNI 5958:1985 Prodotti di fibre minerali per isolamento termico e acustico. Termini e definizioni.

UNI 8811:1987 Fibre minerali. Feltri resinati per l'isolamento termico. Criteri di accettazione.

UNI 9051:1987 Materie plastiche cellulari rigide. Pannelli di poliuretano espanso rigido con paramenti flessibili prodotti in continuo. Tipi, requisiti e prove.

UNI 9110:1987 Determinazione della resistenza termica di materiali o prodotti isolanti fibrosi comprimibili.

UNI 9299:1988 Fibre minerali. Pannelli resinati semirigidi per isolamento termico. Criteri di accettazione.

UNI 10522:1996 Prodotti di fibre minerali per isolamento termico e acustico. Fibre, feltri, pannelli e coppelle. Determinazione del contenuto di sostanze volatili.

UNI EN 13495:2003 Isolanti termici per edilizia – Determinazione della resistenza allo strappo dei sistemi di isolamento termico per l'esterno (cappotti) (prova del blocco di schiuma espanso).

UNI EN 13497:2003 Isolanti termici per edilizia – Determinazione della resistenza alla penetrazione dei sistemi di isolamento termico per l'esterno (cappotti).

UNI EN 13498:2003 Isolanti termici per edilizia – Determinazione della resistenza alla penetrazione dei sistemi di isolamento termico per l'esterno (cappotti).

UNI EN 13499:2005 Isolanti termici per edilizia – Sistemi compositi di isolamento termico per l'esterno (ETICS) a base di polistirene espanso – Specifica.

UNI EN 13500:2005 Isolanti termici per edilizia – Sistemi compositi di isolamento termico per l'esterno (ETICS) a base di lana minerale – Specifica.

UNI EN 13820:2004 Isolanti termici per edilizia – Determinazione del contenuto di sostanza organica.

UNI EN 14064-1:2010 Isolanti termici per l'edilizia – Prodotti sfusi di lana minerale (MW) realizzati in sito – Parte 1: Specifiche per i prodotti sfusi prima dell'installazione.

UNI EN 14064-2:2010 Isolanti termici per l'edilizia – Prodotti sfusi di lana minerale (MW) realizzati in sito – Parte 2: Specifiche per i prodotti installati.

UNI EN 14316-1:2005 Isolanti termici per edilizia – Isolamento termico realizzato in sito con prodotti di perlite espansa (EP) – Parte 1: Specifiche per i prodotti legati e sfusi prima della messa in opera.

UNI EN 14316-2:2007 Isolanti termici per edilizia – Isolamento termico realizzato in sito con prodotti di perlite espansa (EP) – Parte 2: Specifiche per prodotti messi in opera.

UNI EN 14317-1:2005 Isolanti termici per edilizia – Isolamento termico realizzato in sito con prodotti di vermiculite espansa (EV) – Parte 1: Specifiche per i prodotti legati e sfusi prima della messa in opera.

UNI EN 14317-2:2007 Isolanti termici per edilizia – Isolamento termico realizzato in sito con prodotti di vermiculite espansa (EV) – Parte 2: Specifiche per prodotti messi in opera.

3.3.2 Dalla pannello isolante in fibra vegetale al pacchetto modulare coibentante.

Nel paragrafo 1.3 è stato trattato l'impiego delle fibre vegetali in edilizia; in linea generale è possibile affermare che tutte le fibre vegetali presentano un elevato potere termoisolante i valori oscillano tra 0,038 e 0,09 (W/mK) e delle buone capacità di permeabilità al vapore, posso avere alcuni ponti di debolezza come la poca resistenza al fuoco che può essere migliorata trattando la fibra con sali di boro.

I prodotti più diffusi si presentano sotto forma di pannello con densità variabile; in base ai valori di densità i pannelli possono essere più o meno rigidi. Accanto a questa tipologia di prodotto trovano spazio alcuni prodotti innovativi, che mediante la standardizzazione del prodotto e la prefabbricazione di sistemi/ pacchetto consentono di ridurre notevolmente i tempi di posa in opera. Il vantaggio di mettere in opera dei sistemi pre-assemblati nello stabilimento produttivo rientrano nella gestione industrializzata del processo edilizio; il prodotto finale ottenuto con questi processi è in linea con i discorsi dell'efficienza dei prodotti edilizi. Prendono atto delle strategie di mercato si è pensato di delineare i requisiti del sistema oggetto di studio prevedendo, che siano verificate le esigenze di :

- **Salvaguardia dell'ambiente**, definito come l'insieme delle condizioni relative al mantenimento e miglioramento degli stati dei sovrasistemi di cui il sistema edilizio fa parte.

Degli aspetti che in parte incidono sul livello di soddisfacimento di questo requisito sono:

la recuperabilità, la smontabilità, la separabilità e l'omogeneità dei componenti, considerare queste condizioni comporta una particolare attenzione della valutazione/previsione delle modalità di connessione/sconnessione di ciascun elemento componente del sistema.

Recuperabilità: è l'attitudine ad essere recuperato a fine vita. Ciò presuppone che il componente sia reimpiegabile o riutilizzabile o riciclabile. Ogni elemento ed in particolare il sistema coibentante in paglia dovrebbe essere concepito in modo tale che nel caso di una



Figura 123. pannello rigido in sughero



Figura 124. messa in opera sistema coibentante prontomat – isolante in lana di pecora



Figura 125. Isolante in rotoli fibra vegetale

sua eventuale rimozione/ricollocazione dovuta ad interventi manutentivi, o di sostituzione dovuti ad obsolescenza tecnologica e/o funzionale sia possibile ed agevole prevederne la sostituzione .

Smontabilità: prima di definire il recupero dell' elemento componete occorre disporre la smontabilità del sistema pacchetto; la connessione tra i singoli elementi dovrebbe fatta in modo tale da non richiedere costi aggiuntivi per separare gli elementi, la separabilità dei componenti deve garantire agevolmente la separazione degli stessi per facilitare la loro immissione in processi di riciclo e/o smaltimento.

Omogeneità dei componenti: la scelta di utilizzare materiale prime naturali atte a definire elementi/ componenti sostenibili consente di non impiegare materie prime estranee alla filiera dei prodotti edilizi ecosostenibili, la scelta di ridurre l'uso di materiali e prodotti con caratteristiche chimiche che potessero compromettere il valore "eco" del prodotto finale è stata eseguita considerando a monte lo scenario di fine biologico del sistema/ pacchetto finale, l'assemblaggio a secco del sistema soddisfa i requisiti succitati.

- **Gestione**, racchiude l'insieme delle condizioni relative all'economia di esercizio del sistema edilizio il requisito della gestione è stato declinato secondo: l'economicità nella fase di realizzazione; l' economicità nella fase di manutenzione; l' economicità nella fase di dismissione e riciclo degli elementi che compongono il sistema.

4. CARATTERIZZAZIONE DELL'ELEMENTO ISOLANTE DEL SISTEMA OGGETTO DI STUDIO: PANNELLO SANDWICH A BASE DI UN BIOCOMPOSITO ORGANICO

4.1 Premesse e caratteristiche del pannello Sandwich

L'elemento isolante che compone il sistema modulare ventilato per coperture proposto nella ricerca è stato progettato considerando sia l'aspetto del prodotto che la sua *funzionalità* (sia in termini prestazionali che in termini di assemblaggio e disassemblaggio).

Dal punto di vista della composizione geometrica, il campione è realizzato proponendo il design in uso per pannelli sandwich. Le prestazioni termo-meccaniche dei pannelli sandwich sono ampiamente documentate in letteratura, i più diffusi pannelli sandwich presenti in ambito edilizio sono i pannelli coibentanti per coperture, realizzati in lana di roccia¹²¹ e alluminio, oppure poliuretano¹²² e alluminio, materiali schiumosi¹²³ ecc; tuttavia, attualmente, la spinta verso la sostenibilità ha aperto le porte a categorie di prodotto più attente alla naturalità delle materie prime, tant'è che è possibile acquistare dei pannelli sandwich prodotti interamente con fonti rinnovabili, come, a titolo esemplificativo, i pannelli legno e sughero (Fig 126). Altre innovazioni di prodotto sono quelli riguardanti i pannelli termoisolanti formati dal sughero compresso e dal feltro nano-poroso in Aerogel¹²⁴ di silice (costituito dal 50% di fibre rinforzate di poliestere e 50% di fibre di vetro ad alta densità) (Fig 127). La combinazione di questi due materiali consente di ottenere un pannello altamente performante sia per la funzione termica che per quella acustica, l'uso del sughero consente di ridurre i problemi di umidità, muffe e condense, mentre l'aerogel garantisce con degli spessori minimi una delle più elevate performance termica di cui sono dotati i prodotti sul mercato. In genere al fine di ottenere dei pannelli sandwich, si esegue una procedura che comporta delle trasformazioni tecnologiche e una formalizzazione atta ad ottenere due elementi distinti, che vengono accoppiati ad hoc seguendo un iter specifico; l'elemento esterno, cosiddetto "skin", è presente su

121. La lana di roccia è un silicato amorfo ricavato dalla roccia ed è un materiale molto versatile, utilizzato soprattutto nell'edilizia e per larga parte delle isolazioni navali.

122. Il poliuretano può essere un polimero termoplastico, o termoindurente, in commercio il poliuretano si presenta sia come pannelli rigidi che flessibili, in edilizia sono usati principalmente come materiale isolante.

123. Le schiume sono materiali cellulari ottenuti mediante la dispersione di un gas in un materiale plastico solido. Si distinguono principalmente in due categorie: a celle aperte, quando la fase gassosa è continua; e a celle chiuse, se la fase gassosa non è interconnessa; si possono ancora avere schiume flessibile, semi-rigida o rigida e possono essere prodotte sia con materiali termoplastici che termoindurenti, attualmente esistono anche prodotti alternativi biologici quali le schiume a base di soia.

124. L'aerogel è materiale dotato di una bassissima densità, è stato prodotto per la prima volta nel 1931 da Steven Kistler, il primo materiale con cui è stata sperimentata la realizzazione dell'aerogel è il silicio, dal punto di vista compositivo questo materiale è composto per 99,8% di aria e dal 0,2% di diossido di silicio, altre materie prime usate per produrlo sono: alluminio, cromo, e stagno



Figura 126. Pannello sandwich legno/sughero

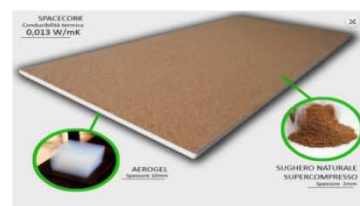


Figura 127. Pannello sandwich aerogel /sughero

entrambe le facce esterne del pannello, che posseggono elevate prestazioni di resistenza; la parte interna, invece, il cosiddetto "core" (dall'inglese core, centro, cuore) rappresenta l'elemento centrale e fondamentale, che offre alte prestazioni di isolamento e che serve anche a distanziare e a collegare intrinsecamente le due facce. Il prodotto finale di questa tecnologia è un pannello dotato di ottime proprietà meccaniche e elevata leggerezza, proprio in virtù dell'esigenza di leggerezza l'innovazione tecnologica ha portato alla caratterizzazione di pannelli sandwich con core in Honeycomb. La geometria della struttura Honeycomb si ispira una struttura dell'alveare (fig. 128); l'elemento core concepito con questa geometria può essere realizzato in diversi materiali (alluminio, polimeri, carta), mentre l'obiettivo finale è sempre lo stesso, cioè dematerializzare il componente core e garantire delle elevate prestazioni. I pannelli sandwich in Honeycomb sono stati adottati nel settore aerospaziale, nautico e dei trasporti ma oggi tale tecnologia trova ampio utilizzo anche in edilizia nella progettazione delle facce continue (fig. 129). Tale premessa sulla struttura dei pannelli sandwich si è resa doverosa in quanto, in questo lavoro di ricerca, l'elemento isolante, inserito nel sistema modulare ventilato di copertura, per ragioni che verranno specificate nei prossimi paragrafi è stato concepito proprio secondo questo design di prodotto (Fig 130).

4.1.1 Studio delle caratteristiche delle materie prime impiegate per produrre l'elemento campione: pannello sandwich isolante in paglia e PLA

I materiali usati per caratterizzare il campione sono stati scelti valutando le caratteristiche di biocompatibilità e l'eco sostenibilità delle materie prime. Dalla letteratura scientifica sono state desunte le informazioni di base per comprendere il valore della progettazione eco orientata. I primi esperimenti sull'uso delle fibre naturali come "materiali alternativi" da impiegare nella caratterizzazione dei materiali compositi risalgono agli anni '30 quando la casa

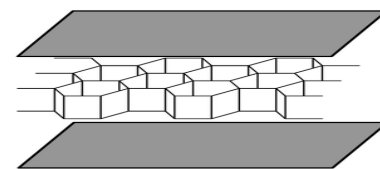


Figura 128. Struttura sandwich_ Core a nido d'ape



Figura 129. Rivestimento in pannello composito in honeycomb Larcore A2 traffic white - Ferragamo Headquarter, Firenze (FI)

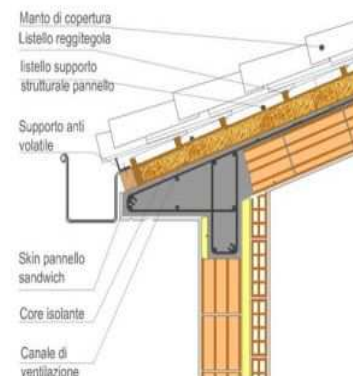


Figura 130. Riferimento applicazione d'uso del sistema modulare per le coperture

automobilistica statunitense della Ford, in qualità di industria dell'innovazione si fece carico di alcune ricerche sulla progettazione di materiali termoplastici "Bio"; nello specifico i risultati delle ricerche dimostrarono la buona resistenza meccanica di un materiale termoplastico prodotto dalla canapa e dalla resina di soia. La diffusione della crisi energetica prima e la problematica ambientale oggi, allo stato attuale animano le innovazioni di prodotto e processo. Se negli anni '30 la proposta lungimirante e visionaria di John Ford dovette soccombere di fronte alla diffusione dei prodotti termoplastici e termoindurenti di natura sintetica. La strategia di prodotto sostenibile attuale tende sempre più a sostituire il materiale sintetico con quello di origine naturale; le maggiori innovazioni di prodotto sono partite proprio dal settore automobilistico. L'introduzione della direttiva Europea 2000/53/EC -The End of Life Vehicles- ha imposto delle prescrizioni sul quantitativo di componenti da conferire in discarica per i veicoli da demolire così restrittive (15% entro il 2005 e fino al 5% nel 2015) che il ricorso all'uso di prodotti compatibili con l'ambiente si è reso indispensabile. Gli effetti di queste limitazioni hanno portato alla definizione di nuovi materiali come ad esempio il Fibrowood¹²⁵ e Fibri¹²⁶. Un'ulteriore ricerca nel campo dell'uso automobilistico delle fibre naturali appare interessante e degna di nota: la sperimentazione dei polimeri termoplastici condotta dal "Ontario BIocar Initiative" in partenariato con l'università e che ha prodotto un nuovo tipo di polimero, che è stato elaborato a partire dalle sostanze base della paglia e del polipropilene; in particolare la produzione del polimero segue le procedure convenzionali definite dalle metodologie di fabbricazione maggiormente diffuse, quali quelle del Lay-up manuale o stampaggio a contatto, a pultrusione, a estrusione, a stampaggio oppure a iniezione.

Hai fini della ricerca si è reso indispensabile comprendere sia le filiere produttive dei prodotti realizzati con la paglia (capitolo 2) che quella del PLA. L'acronimo PLA indica il poliestere biodegradabile ottenuto dalla sintesi dei monomeri bioderivati, ovvero mais, patata,

6. Madurwar, M. V., Ralegaonkar, R. V., & Mandavgane, S. A. (2013). Application of agro-waste for sustainable construction materials: A review. *Construction and building materials*, 38, 872-878.

125. Fibrowood, è un composito con matrice acrilica e fibre derivate dal legno che può essere trasformato per stampaggio a compressione in stampi ad alta temperatura. Il contenuto di fibra nel Fibrowood è del 70%. Questo prodotto è utilizzato per: copertura di sportelli, coperture per pannelli di strumentazione, coperture per sedili. Fibrowood è in produzione dal 1998 ed è utilizzato da Ford, Kia, Mercedes-Benz, Opel, Hyundai.

126. Fibril è un prodotto realizzato con processi simili alla produzione della carta. Il contenuto di fibra naturale è pari al 94%, una percentuale alta che assicura al prodotto stabilità di prezzo rispetto alle variazioni delle risorse da combustibile fossile. Fibril è basato su fibre derivate dal legno e un legante acrilico, è in produzione dal 1954 ed è utilizzato da Opel.

barbabietola, ecc; allo stato attuale il PLA è la principale materia utilizzata per la produzione della bioplastica¹²⁷ presente sul mercato.

La produzione di bioplastiche rappresenta la sfida del nostro tempo, dalle stime di produzione condotta dall'European Bioplastics in soli sette anni la capacità totale produttiva è passata da 249 milioni di tonnellate a quasi 6 milioni di tonnellate (fig. 140). L'Institute of Bioplastics and Biocomposites afferma che la produzione di bioplastica può essere supportata sia da materie prime rinnovabili e biodegradabili che da materie prime non biodegradabili. Nella figura 154 sono riportate quattro tipologie di plastiche, sull'asse orizzontale sono individuate le plastiche biodegradabili e quelle non biodegradabili, mentre sull'asse verticale in plastica derivata da fonti rinnovabili o da materiali petrolchimici. I quattro gruppi di plastiche che ne derivano sono:

1. Plastiche non-biodegradabili di origine petrolchimica, tra cui le plastiche tradizionali (es. PE, PP, PET)
2. Plastiche biodegradabili di origine naturale, cioè plastiche originate da biomassa e aventi la proprietà di biodegradare (es. PLA, PHA, derivati dell'amido)
3. Plastiche biodegradabili di origine petrolchimica, cioè plastiche che possono biodegradare ma sono prodotte a partire da fonti fossili (Es. PBAT, PBS, PCL)
4. Plastiche non biodegradabili derivate da fonti rinnovabili, cioè plastiche prodotte a partire dalla biomassa ma che non possiedono la proprietà di biodegradare (Es bio-PE, Biobased PET).

Per quanto dunque affermato, il PLA è stato classificato come materiale derivato da fonti di energia e di materia rinnovabili, mentre si considera allo stesso tempo anche biodegradabile: possiamo dunque concludere che i prodotti in PLA siano considerabili a tutti gli effetti "environmentally friendly".

127. Secondo la norma UNI EN 13432:2002 lo si come materiale plastico proveniente da fonte rinnovabile di origine naturale, può essere costituita da materiale plastico biodegradabile

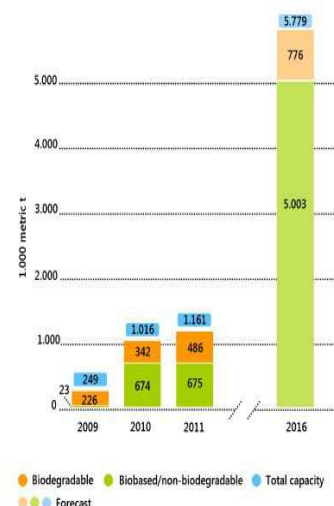


Figura 140. Stime di produzione Bioplastica. Fonte: Pubblicazione realizzata nell'ambito del progetto Plastiche supporto dal FESR

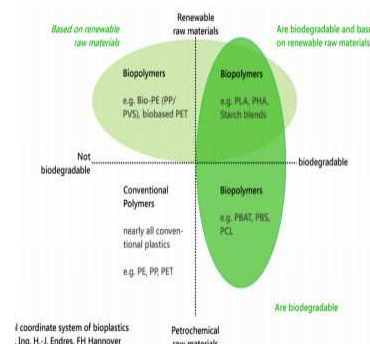


Figura 141. distinzione dei polimeri in base alla biodegradabilità e alla natura delle materie prime. Fonte: European Bioplastics

La scelta di incentivare le ricerche dei prodotti chimici verdi ha condotto a sviluppare delle strategie produttive, che mirassero a progettare e fabbricare prodotti e sistemi derivati da materiali e fonti di energia a basso impatto ambientale; la processabilità del prodotto a fine vita mediante la compostabilità e biodegradabilità è una prerogativa dei materiali biopolimerici. L'European Bioplastics Association¹²⁸, definisce i biopolimeri classificandoli in tre categorie:

- Biopolimeri rinnovabili non biodegradabili
- Biopolimeri rinnovabili biodegradabili
- Biopolimeri da fonti fossili biodegradabili.

4.1.2 La componente matrice in PLA

La letteratura scientifica qualifica l'acido polilattico come un biopoliestere, ovvero un poliestere biodegradabile. Attraverso la schematizzazione proposta da Avérous (Fig.142) si definiscono due famiglie di polimeri biodegradabili, gli agro-polimeri che provengono dalle agro risorse e dalle biomasse vegetali come legno e paglia e i biopoliesteri che sebbene siano dotati di caratteristiche di biocompatibilità e biodegradabilità possono essere prodotti anche da materie prime di origine petrolchimica. La biocompatibilità del PLA rende il materiale molto impiegato nel campo biomedicale, infatti, la "non interferenza" con l'organismo umano evita sia che ci sia l'espulsione da parte dello stesso, sia che questo entri in contatto con sostanze tossiche. L'impatto "non nocivo" del PLA lo si può riscontrare anche nei confronti dell'ambiente; il materiale degrada mediante degradazione abiotica¹²⁹, quindi consente di avere un fine vita sostenibile ma anche dal punto di vista dell'origine è generato da materie prime rispettose dell'ambiente, infatti, si ottiene processando monomeri prodotti dalla fermentazione dei carboidrati.

128. l'associazione impegnata a garantire la diffusione della bioplastica come risorsa innovativa, nonché valida alternativa alle materie plastiche di origine petrolchimica.
<http://en.european-bioplastics.org/>

129. quando la degradazione può avvenire anche in assenza di enzimi; alcuni processi di degradazione abiotica sono l'idrolisi, la degradazione fotochimica, i processi di ossido riduzione, etc.,

AGROPOLIMERI	Prodotti da biomasse e da agro risorse	
	Polisaccaridi	Proteine e lipidi
	Amido	Animali
	Grano Patate mais	Siero Collagene Gelatina Caseina
	Ligo-cellulosici	Piante
	Legno Paglia	Soia glutine
	Pectina Chitina	
BIOPOLIESTERI	Da microrganismi per estrazione	
	Poli-idrossi alcanati PHA	
	Poli-idrossi butinati, PHB	
	Poli-idrossi butinati	
	Co-idrossivalenti PHBV	
	Da biotecnologie	
	Acido lattico (PLA)	
	Da prodotti petrolchimici	
	Policaprolattone (PCL)	
	Poli esteriammidi	
	Co-poliesteri	
	Co-poliesteri aromatici	

Figura 142. Classificazione biopolimeri rielaborazione autore fonte: Avérous

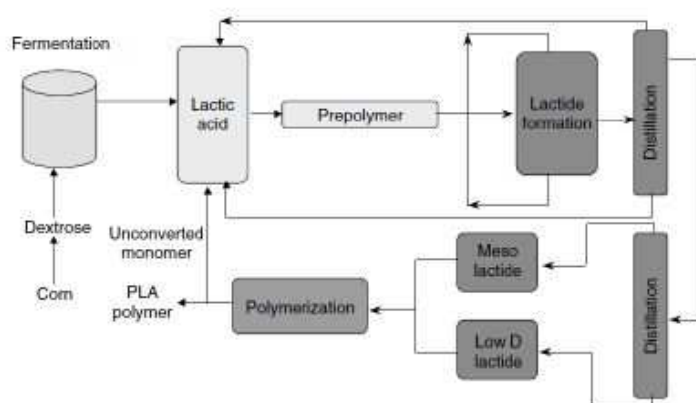


Figura 143 Schematizzazione del processo di realizzazione del PLA.
Fonte: Polylactic Acid Technology, David E. Henton, Patrick Gruber, Jim Lunt, and Jed Randall.

La biodegradabilità e la compostabilità sono le principali caratteristiche dei biopolimeri, spesso i due termini sono confusi ma è bene ricordare che un materiale è compostabile se è anche biodegradabile e cioè è convertibile metabolicamente in anidride carbonica. I requisiti di compostabilità sono:

- la disintegrabile (frammentabile e non più visibile nel compost);
- l'assenza di aspetti negativi sul processo di compostaggio;
- la non riduzione del valore agronomico del compost.

Il riferimento normativo sulla biodegradabilità del materiale è la norma UNI EN 14046:2003 Imballaggi - Valutazione della biodegradabilità aerobica ultima dei materiali di imballaggio nelle condizioni controllate di compostaggio - Metodo mediante analisi dell'anidride carbonica rilasciata; il livello di accettazione si ha quando il 90% di prodotto biodegrada in un lasso di tempo inferiore ai 6 mesi. Nella tabella 1 si riportano i dati relativi ai tempi di compostaggio di alcuni materiali utilizzati nell'imballaggio alimentare. La tendenza ad impiegare il PLA nel campo del packaging alimentare è infatti molto diffusa, bottiglie, stoviglie e imballaggi sono sempre più presenti sul mercato; dai dati presenti in letteratura (G. Bogoeva-Gaceva, at 2007) uno dei PLA è la poca concorrenzialità in termini di prezzo rispetto ai polimeri sintetici

Materiale	Mesi
Amido	>1
PHB	1
Proteine	1,5
PHA	1,3
Cellulosa	1,5-3,5
Carta	3,5-6
Legno	4-6

Tabella 18. Tempi di compostaggio di alcuni imballaggi alimentari. Fonte : Piergiovanni, L., & Limbo, S. (2010). Food packaging: Materiali, tecnologie e soluzioni. Springer Science & Business Media.

Polimero	Euro Kg	Polimero Biodeg	Euro Kg
HDPE	0,92	PLA	3-4
LLDPE	0,82	POLIES	3,5-5
PP	0,80	BAK	5,58
PS	1,08	PCL	8,3
PVC	0,78	AMIDO	2-4

Tabella 19. Confronto costo polimeri biodegradabili e non. Fonte: Natural Fiber Eco-Composites, G. Bogoeva-Gaceva, M. Avella, M. Malinconico, A. Buzarovska, A. Grozdanov, G. Gentile, M.E. Errico

(Tab 2). Un scenario d'uso del PLA più linea con il contesto architettonico è dato dalla produzione di oggetti di design; la diffusione della stampa 3d come tecnologia produttiva dei materiali termoplastici consente di produrre oggetti di uso comune in PLA; i filamenti di PLA e di ABS sono infatti le materie prime più impiegati nei processi di stampa 3d (Fig. 144).

L'acido polilattico che venne isolato per la prima volta dal latte nel 1780 dal chimico svedese Scheele, ma la produzione commerciale si diffuse solo verso la fine del XIX secolo, le materie prime impiegate per produrre l'acido polilattico sono le piante ricche di amido, quindi mais, patate, barbabietole. I processi di sintesi possono avvenire sia per azione chimica che per processi fermentativi; nel primo caso la fase più importante del processo è quella dell'idrolisi del lattonitrile; l'impiego di un acido forte consente di ottenere una miscela racemica delle due forme, D e L (Fig 145).

Per quanto riguarda il processo fermentativo, esso viene impiegato mediante batteri per ottenere l'acido lattico dal glucosio estratto dalle piante. A questa fase segue la polimerizzazione e, quindi, la produzione di acido polilattico (Fig. 146)

Il processo fermentativo, a seconda dei ceppi batterici utilizzati, si distingue in eterofermentativo e omofermentativo.

La differenza tra le due definizioni dipende dal tipo di prodotto finale ottenuto, nel primo caso oltre all'acido lattico si producono ad esempio anche l'etanolo, l'acido acetico, il glicerolo e l'anidride carbonica, mentre, nel secondo, solo l'acido lattico. L'ultima fase del processo di sintesi è quella della polimerizzazione dell'acido polilattico ed è relativa alla produzione del prodotto finito.

La sintesi del PLA può seguire tre percorsi principali.

- Polimerizzazione dell'acido lattico per condensazione: detta anche diretta, che è stato il primo metodo utilizzato per la produzione di PLA e, ad ora, rappresenta il metodo più economico e semplice per ottenerlo. Il polimero che si ottiene con questo metodo, presenta un basso peso molecolare e quindi una



Figura 144

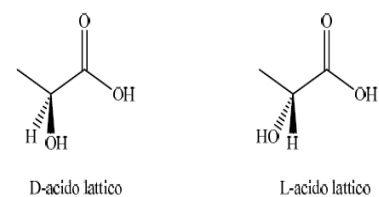


Figura 145 Componenti dell'acido lattico

Fonte : Vink ETH, Rabago KR, Glassner DA, Gruber PR. (2003)

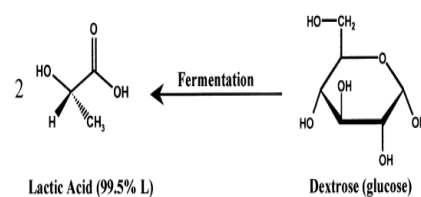


Figura 146. Processo di produzione dell'acido lattico tramite la fermentazione

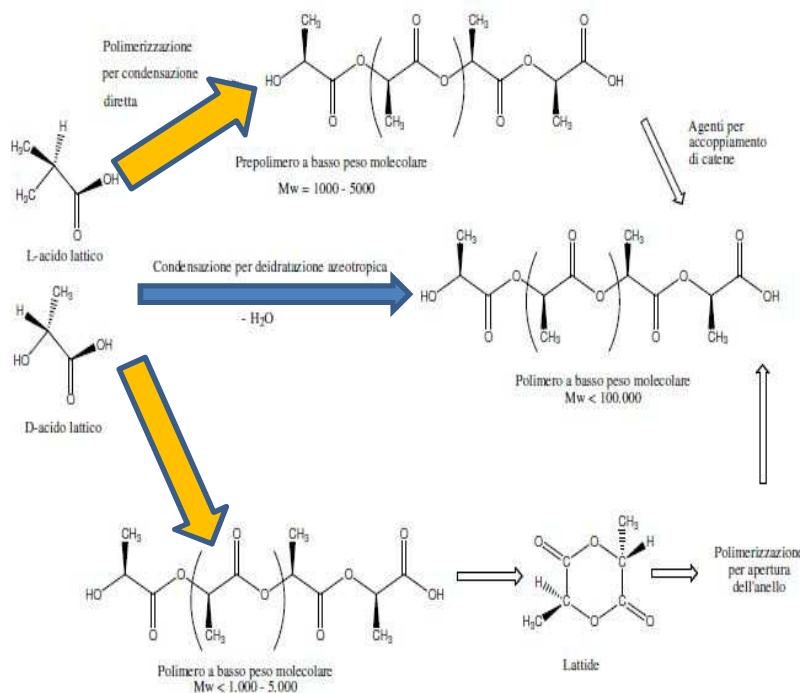
Fonte : Vink ETH, Rabago KR, Glassner DA, Gruber PR. (2003)

condizioni di fragilità e bassi valori meccanici. E' possibile aumentare il peso molecolare utilizzando coadiuvanti che favoriscono l'esterificazione o agenti che favoriscono l'estensione della catena; tale intervento comporta l'aumento dei costi del processo e una maggiore complessità dello stesso.

- Polimerizzazione dell'acido lattico per condensazione azeotropica:

anche questo è un metodo diretto, ma differisce dal caso della polimerizzazione per condensazione perché non richiede l'uso di agenti esterni per innalzare il peso molecolare dell'acido polilattico.

- Polimerizzazione con apertura dell'anello (ROP)



[1]Vink ETH, Rabago KR, Glassner DA, Gruber PR. Applications of life cycle assessment to NatureWorks™ polylactide(PLA) production. Polymer Degradation Stability 80, 403-419 (2003)

Figura 147. Schematizzazione dei diversi processi di polimerizzazione

4.1.3 La produzione di PLA :impatto ambientale

Come già affermato nei paragrafi precedenti l'aspetto più interessante del PLA è il ridotto impatto ambientale stimato per questo biopolimero. Secondo quanto viene riportato in uno dei primi studi

[1] LCA del prodotto, per poter produrre 1 kg di pellet in Pla occorrono circa 2,5 Kg di mais, 54 MJ di energia e circa 50 kg di acqua. Si riporta di seguito il diagramma di flusso della produzione del Pla e il relativo consumo energetico. (Fig. 148)

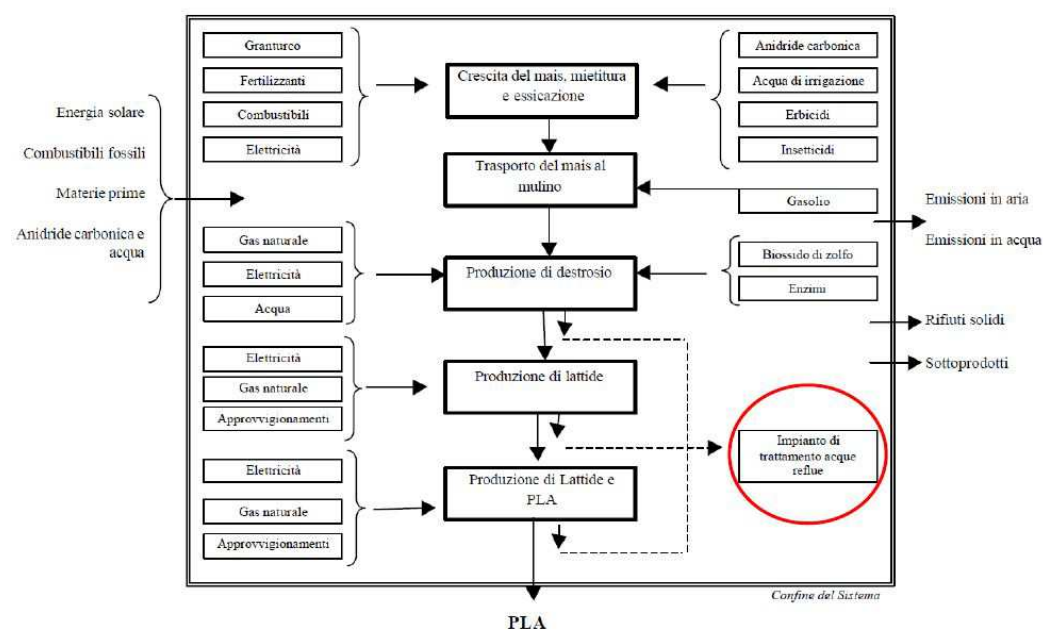


Figura 148. Diagramma di flusso produzione PLA

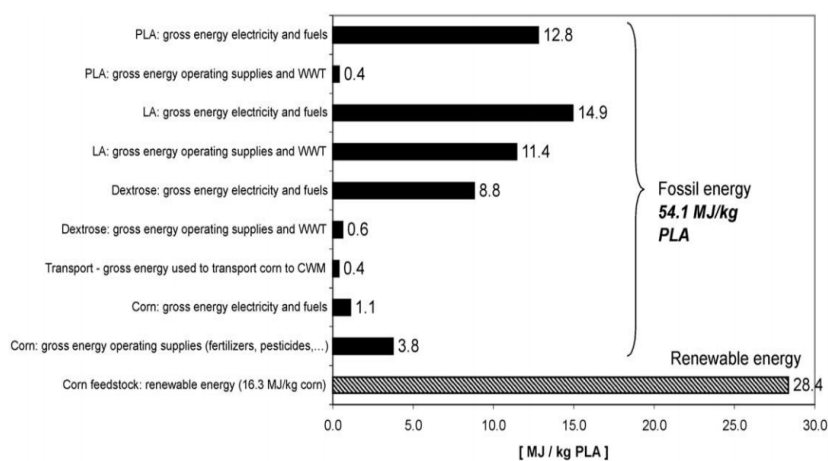
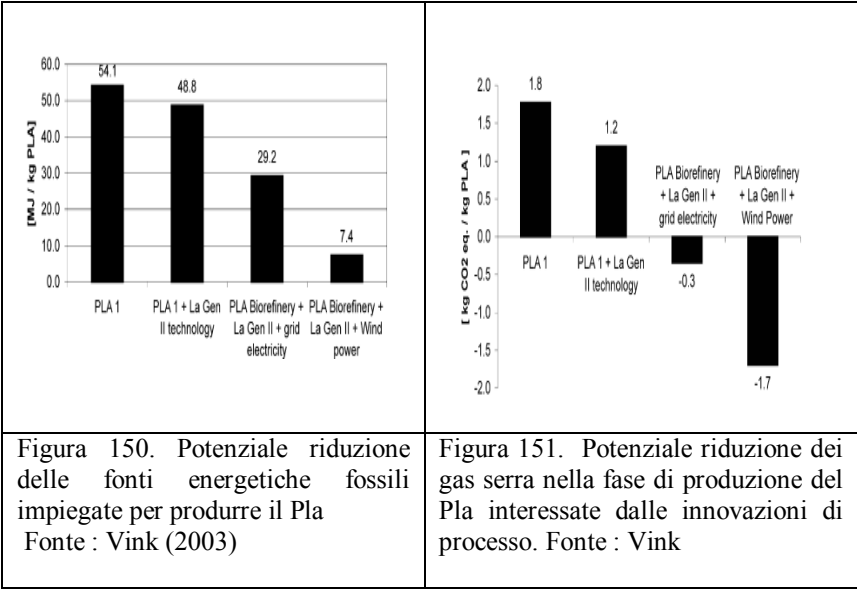


Figura 149. Il contributo energetico della produzione del PLA Fonte :Vink (2003)

L'innovazione del processo produttivo e l'introduzione di alcune scelte strategiche come l'uso di energie provenienti da fonti rinnovabili, in primis l'energia eolica evidenzia una notevole

riduzione dello sia dell'uso di materie prime meno nobili come residui colturali quali steli, paglia e gusci, l'uso di bioraffinerie per i processi di fermentazione degli zuccheri provenienti dalla cellulosa e dalla emicellulosa, l'impiego della frazione di lignina residuale come materia prima per la produzione del vapore richiesto per i processi di conversione, ha permesso di ridurre sia l'impatto dei gas serra ma anche ridurre il consumo di energie (Fig.150-151)



4.1.4 La paglia: problemi di interfaccia e soluzioni per migliorarne l'aderenza

La paglia come la maggior parte delle fibre vegetali è composta principalmente dalla cellulosa, dalla emicellulosa, dalla lignina (Fig 152); la fibra di paglia si compone di un ulteriore strato superficiale, come si evince dalla tabella 3, le fibre in questione differiscono dalla composizione delle fibre legnose per la presenza di uno strato superficiale definito come altro ma che nello specifico si compone di silice e cere.

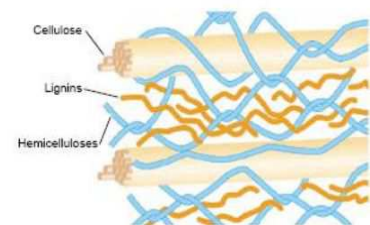


Figura 152. Struttura fibre vegetale

	Emicellulosa %	Cellulosa%		Lignina %	Altro %
Paglia di grano	26,4	40,8		22,9	9,9
Paglia di riso	25,9	40,8	17,9	15,4	
Fibra di abete	30,17	44,31	25,20	0,32	
Tabella 3 Caratteristiche chimiche delle fibre di paglia e di legno Fonte: Yasina, M., Bhuttob, A. W., Bazmia, A. A., & Karimb, S. (2010). Efficient utilization of rice-wheat straw to produce value-added composite products. <i>International Journal</i> , 1(2).					

La presenza di questo strato superficiale esterno, ben visibile nella lettura microscopica SEM riporta in figura 154 nella caratterizzazione di compositi caricati con la paglia può generare problemi di interfaccia tra la componente matrice e la fibra stessa. Per migliorare dell'aderenza tra i materiali che vengono combinati per produrre i compositi si possono eseguire dei pretrattamenti della fibra in paglia sia di natura meccanica che chimica, nello studio condotto dagli autori Panthapulakkal, S., Zereskhian, A., & Sain, M. (2006), vengono verificate le prestazioni meccaniche di alcune fibre che hanno subito tali pretrattamenti. Confrontando le superfici della fibra trattata chimicamente e meccanicamente si riscontra come prima cosa una maggiore omogeneità della superficie trattate chimicamente; Dal punto di vista delle prestazioni meccaniche, sempre secondo lo studio di questi autori le fibre trattate chimicamente presentano delle prestazioni migliori rispetto a quelle trattate meccanicamente (Tab. 4)

Proprietà	Lavorazioni chimica	Lavorazioni meccaniche
Resistenza alla trazione (MPa)	40.8 ± 0.5	35.5 ± 0.8
Modulo a trazione (GPa)	2.99 ± 0.04	2.44 ± 0.03
Resistenza alla flessione (MPa)	74.6 ± 1.2	74.5 ± 0.6
Modulo di flessione (GPa)	3.45 ± 0.04	2.98 ± 0.06
Tabella 19. Proprietà meccaniche delle fibre di paglia di grano trattate chimicamente e meccanicamente rielaborazione dell'autore fonte: Panthapulakkal, S., Zereskhian, A., & Sain, M. (2006). [2]		

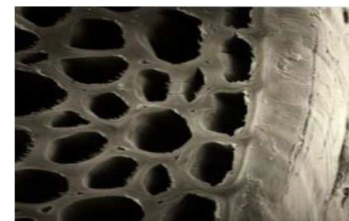


Figura 153. Immagine microscopio SEM della fibra di paglia fonte: Yasina, M., Bhuttob, A. W., Bazmia, A. A., & Karimb, S. (2010).

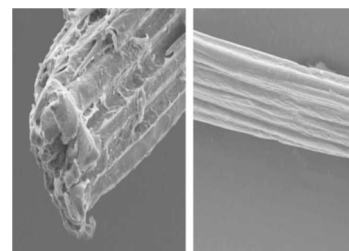


Figura 154. Immagine microscopio SEM della fibra di paglia trattata meccanicamente e chimicamente fonte: Yasina, M., Bhuttob, A. W., Bazmia, A. A., & Karimb, S. (2010).

Altre ricerche si concentrano sulla stabilità termica conferita alla fibra di paglia in seguito a questi tipi di trattamento; nello specifico attraverso il grafico delle curve TGA (Fig. 156) è possibile riscontrare che i trattamenti chimici hanno un punto di degrado massimo molto più elevato di quelle trattate meccanicamente. Gli autori Bekhta, P., Korkut, S., & Hiziroglu, S. (2013), approfondiscono lo studio sui benefici riscontrati in funzione del Pre- trattamento imposto alle fibre. Dalla ricerca è stato estrapolato lo studio sui trattamenti che possono migliorare la prestazione della fibra di paglia rispetto al parametro dell'assorbimento dell'acqua.

Dal confronto di 5 casi studio, quali :

- Paglia non trattata
- Paglia trattata con il 9% di anidride acetica¹³⁰
- Paglia trattata con soluzione saponosa
- Paglia bollita in acqua
- Paglia trattata con il vapore a 100°C



Figura 157. Caratteristiche di assorbimento dell'acqua su fibre di paglia trattate e non trattate rielaborazione autore da fonte : Bekhta, P., Korkut, S., & Hiziroglu, S. (2013).

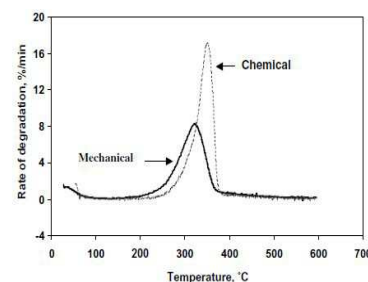


Figura 156. TGA curva di fibre di paglia di grano preparate da processi diversi –meccanico e chimico Fonte: Panthapulakkal, S., Zereschkian, A., & Sain, M. (2006) .

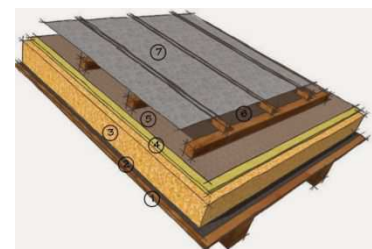
130.L'anidride acetica è un'anidride organica, ottenuta per condensazione di due molecole di acido acetico. Analogamente alle anidridi inorganiche, per reazione con acqua forma l'acido corrispondente. A temperatura ambiente è un liquido incolore dall'odore irritante, da manipolare con particolare cautela.

4.2 Assemblaggio e messa in opera del sistema modulare coibentante ventilato

La scelta di individuare nella prefabbricazione e nel montaggio a secco degli elementi coibentati di copertura la tematica da affrontare nella ricerca di dottorato è governata dalla volontà di collocare lo studio nell'ambito dello sviluppo dei nuovi sistemi di copertura. In passato, la stratificazione a secco di un pacchetto isolante venivano realizzate componendo la stratigrafia con un numero di interventi pari al numero degli strati che componevano il pacchetto di copertura;

questo modo di operare oltre ad avere dei tempi di posa in opera molto lunghi, aumentava il rischio di problemi dovuti alla cattiva messa in opera degli stessi strati funzionali. Nelle soluzioni tecnologiche che interessano la coibentazione in paglia si procede ancora rispettando questa modalità operativa (Fig. 158); invece, con questo lavoro di ricerca, si intende delineare una possibile soluzione alternativa per l'uso della paglia in copertura. L'introduzione di un sistema/pacchetto di copertura coibentante e ventilato, può delineare delle nuove prospettive per la valorizzazione di questo scarto. Le riflessioni sulla soluzione tecnologica da proporre sono maturate dopo aver analizzato i prodotti di mercato che vengono impiegati attualmente per coibentare gli elementi di copertura.

Il primo prodotto di riferimento è stato il pannello strutturale Isotec (Fig. 159), tuttavia la natura dei materiali impiegati nel pannello (utilizza un'anima di poliuretano) non suggeriva un confronto diretto con la proposta di ricerca; si è quindi ampliata l'analisi ai prodotti di mercato che svolgono la stessa funzione coibentante e di ventilazione del pannello isotec ma con caratteristiche materiche di origine naturale. La preoccupazione ambientale ha spinto molte aziende a proporre l'innovazione di prodotto prediligendo l'uso delle fibre vegetali come componente isolante. Il pannello airek ecowood (Fig. 160) della Repack corrisponde alle caratteristiche di prodotto cercate: L'ecologicità dei prodotti, la facile posa in opera, l'isolamento termico, la ventilazione sono i requisiti che vengono richiesti per la soluzione studiata; La scelta di utilizzare la fibra vegetale come componente isolante apre delle riflessioni sulla durabilità del prodotto¹⁴; affinché il prodotto sia concorrenziale con i materiali sintetici occorre prevedere uno scenario di vita utile di almeno 30 anni, infatti, la vita utile stimata dei prodotti per l'isolamento può essere compresa tra 30 e 80 anni, a seconda del tipo di materiale e della sua applicazione. Tuttavia, sono disponibili pochissimi risultati pratici che avvalorino queste aspettative. Il primo problema che si è cercato di evitare nel sistema/ pacchetto studiato nella ricerca è stato



1. tavolato di abete sottotetto 22mm
2. freno a vapore 0,3mm
3. balle di paglia 240 mm
4. tavole di abete grezze 22mm
5. telo traspirante 0.3mm
6. camera ventilazione con listelli 100 mm
7. pannelli OSB 22mm

Figura 158. Copertura in paglia
Fonte
<http://padiglionepagliafalze.blogspot.it/>



Figura 159 Copertura con pannello isotec.
Fonte:
<http://isotec.brianzaplatica.it/italiano/prodotti.asp>



Figura 160. Pannello Airek ecowood

quello di evitare la diffusione della condensa inerte (verifica con software termus-G).

Ulteriori prestazioni del sistema che tuttavia non sono state verificate, a causa della mancanza del provino da testare, sono state:

- ingelività;
- resistenza allo choc termico;
- resistenza all'irraggiamento solare;

4.2. 1 Progettazione del sistema/ pacchetto per coperture isolate e ventilate

Il sistema di copertura è stato studiato con l'obiettivo di permettere la separazione dei componenti nella fase di fine vita, per questa ragione, le giunzioni degli elementi avviene riducendo l'uso di viti e qualsiasi altro elemento metallico. Il collegamento telaio/pannello sandwich avviene fissando le *skin* del pannello al telaio in legno attraverso degli incastri con tasselli in legno (Fig.161), e sempre con questa tecnica vengono ancorati anche i listelli in legno che si trovano nel canale di areazione. L'esigenza di inserire i listelli nel canale di areazione è nata per rendere rigido il sistema e non avere problemi durante la fase di montaggio. Il sistema è composto dai seguenti componenti:

- il telaio in legno di abete sagomato lungo 45 cm e con la sezione variabile (Fig. 162).
- il pannello sandwich è composto da un elemento *core* di 80x45x 8cm e delle *skin* di 86x45x 1,8 cm rettangolare 45x90 cm (Fig.163);
- il pannello superiore in eco-boards è posto a chiusura dell'intero sistema e costituisce il piano di supporto per le tegole.
- canale di areazione;

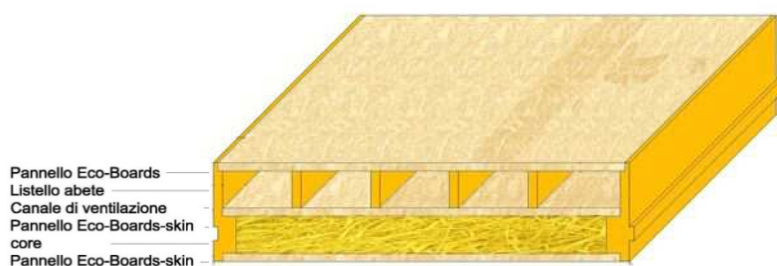


Figura 164. Modello 3d del sistema STRAWind. Elaborazione dell'autore

STRAW_WIND *Ventilated roof*
Sviluppo e sperimentazione di un sistema/componete
per coperture ventilate ecosostenibili
partendo dalla conversione "by products" della paglia



Figura 161. Collegamento parti in legno mediante tasselli in legno

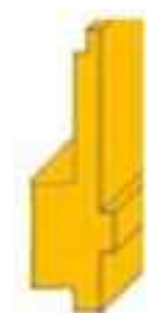


Figura 162. Sezione listello in legno. Elaborazione dell'autore

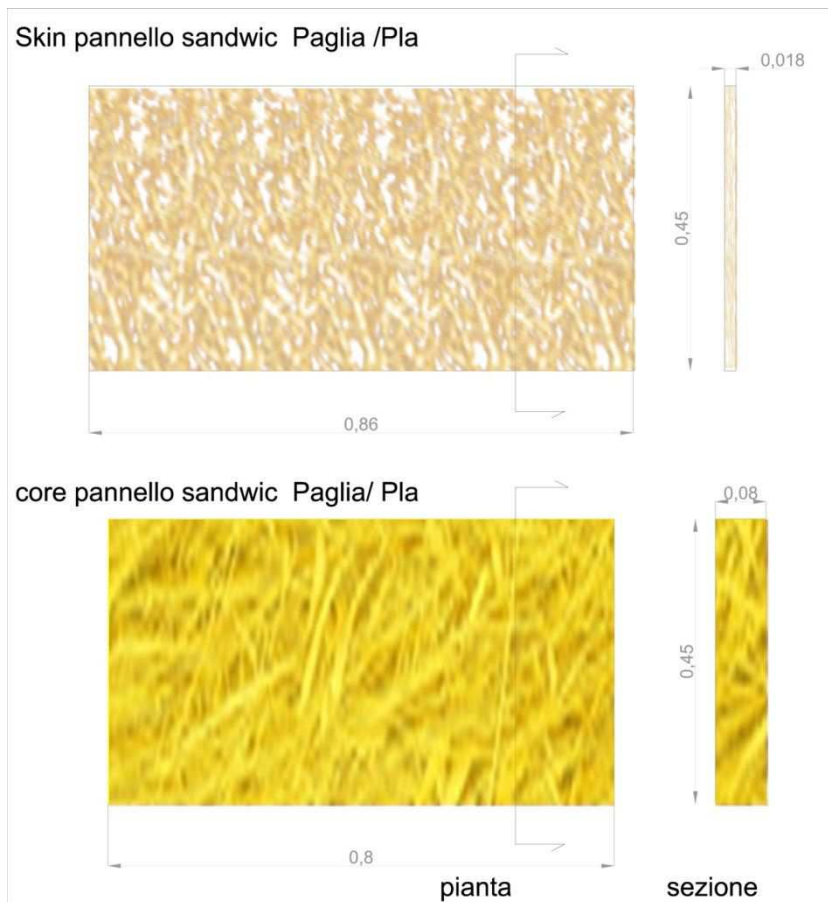


Figura 163. Abaco della struttura portante in legno. Elaborazione dell'autore

La dimensione del pannello modulare è stata individuata nella misura di 90x45 cm per agevolare la fase di messa in opera del sistema; il peso stimato per un pannello siffatto è di circa 20 kg e quindi è possibile procedere con il montaggio dello stesso impiegando solo due operai; il sistema viene posto in opera con le stesse modalità dei pannelli competitor, le cui fasi di montaggio consistono nella posa in opera del listello di partenza, (lungo la linea di gronda), nella posa dei sistemi ed infine nella posa dello strato di copertura. Gli elementi del sistema sono giuntati tra di loro mediante incastri maschio femmina (Fig. 165), e sono fissati al solaio di copertura mediante fischer.

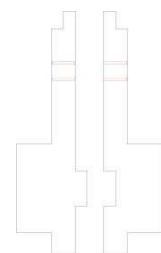


Figura 165. incastro pannelli

4.2.1 Materiali e metodi usati per progettare il componente *core* del pannello coibentante studiato

L'argomentazione e lo studio del PLA e della paglia affrontato nei precedenti paragrafi è stato il supporto di base per lo studio e la caratterizzazione del componente *core* impiegato come semilavorato del pannello sandwich isolante. L'attività di produzione dei campioni è stata condotta in collaborazione con l'Istituto di Chimica e Tecnologia dei Polimeri del CNR di Pozzuoli; con il supporto del Dr. Mario Malinconico e il ricercatore Giacomo Cesareo, sono stati valutati diversi rapporti di paglia e di PLA, tuttavia, data la disponibilità delle strumentazioni dell'Istituto si è convenuto produrre un materiale composito tramite termo-compressione con una densità di 0,5 g/cm³. Il quantitativo di paglia è stato stabilito secondo un rapporto volumetrico di 50/50. Il processo produttivo del campione si è sviluppato attraverso le seguenti fasi:

1. Pre-trattamento materie prime;
2. Miscelazione materie prime;
3. Asciugatura provino;
4. Formatura.

In seguito alla fase di realizzazione del campione sono state eseguite alcune prove termiche e meccaniche che saranno illustrate in modo dettagliato nel capitolo 5, in questo paragrafo, verrà descritto in modo schematico e dettagliato il processo produttivo posto in essere per ottenere il componente *core* oggetto di studio.

Di seguito si riporta una descrizione dettagliata delle fasi produttive degli elementi per la realizzazione del campione *core*

FASE I Pre-trattamento

Lavorare i pellets di PLA (Fig 166) con il cloroformio si è reso indispensabile per ottenere la miscela da adoperare come matrice del composito; sebbene l'uso di un solvente di questo tipo possa essere considerato poco sostenibile, in questa parte del lavoro non è stato



Figura 166 Pellets di PLA

possibile valutare altre tipologie di solventi *eco- friendly use* e si rimandato tale approfondimento a sviluppi futuri della ricerca. Nella progettazione del campione per il quantitativo di cloroformio impiegato (rapporto 1:8) non sono state richieste grosse misure cautelative. La presenza del solvente nel prodotto finale non è stata approfondita in quanto si è supposto che in fase di asciugatura il solvente viene disperso tramite evaporazione. Delineando uno scenario industriale del componente *core* secondo questa caratterizzazione materica, pone delle problematiche di gestione del processo produttivo su vasta scala; la messa in sicurezza degli operatori e dell'impianto stesso potrebbe avere dei costi notevoli e scoraggiare la progettazione del materiale composito concepito in questa prima fase di lavoro.

Il PLA, rappresenta la componente matrice del composito oggetto della ricerca; prima di passare alla fase di miscelazione paglia/ pla nell'apposita camera di miscelazione (fase II) occorre pre-trattare il pla con il cloroformio, tale operazione è estremamente delicata perché espone l'operatore nella fase di produzione all'inalazione del solvente, quindi occorre adottare apposti per tutelare la sua salute. Per quanto riguarda la presenza del solvente nel prodotto finale è bene precisare che nella fase di asciugatura del campione tramite il processo di evaporazione il solvente evapora e quindi non compromette la "naturalità" del prodotto finale. La paglia è stata sminuzzata in modo grossolano sia per non avere dei costi di lavorazione della macinazione sia perché stabilire una dimensione ben definita richiede ulteriori approfondimenti sul rapporto diametro/lunghezza della fibra.

FASE II **Miscelazione materie prime**

In questa fase si prevede che i due componenti "matrice" e "carica" del composito possano essere abbinate mediante un rimescolamento dei materiali; L'operazione di miscelazione avviene in una apposita camera di miscelazione a temperatura ambiente e per un periodo di tempo variabile che oscilla dalle 3 alle 5 ore



Figura 167. Camera di miscelazione matrice fibra

FASE III **Modellazione del campione**

Dopo aver combinato i due materiali si proceduto con l'inserimento della miscela negli stampi preformati in acciaio.

Gli stampi adoperati sono stati:

stampo core 19x19x8 cm,

stampo skin frame di 19x19x0,8 cm

FASE IV **Asciugatura provino**

La fase di asciugatura consente di definire il composito secondo la forma finale; tale operazione richiede circa 2-3 giorni.

FASE V **Termoformatura**

La fase di termoformatura rappresenta la fase di lavorazione che consente di far aderire l'elemento fibroso con la resina in PLA, la fonte di calore impresta in tale fase circa 200°C è tale da far sciogliere la lignina, quindi tramite legatura delle fibre e la resina è possibile ottenere il composito. La pressione applicata viene esercitata in rampa, ovvero aumentata gradualmente da una pressione atmosferica a una pressione di 100 bar. La temperatura non deve essere esercitata per un periodo superiore ai 20 minuti, perché la paglia, ma in generale tutte le fibre vegetali se vengono esposte per troppo tempo a temperature elevate degradano. La scelta di progettare l'elemento secondo il "modello sandwich", risiede nell'aver appurato che tale tecnologia consente di avere un buon rapporto resistenza/peso, ma soprattutto una facilità della posa in opera in termini di assemblaggio del prodotto finito, tale aspetto risulta vantaggioso rispetto alla configurazione finale del prodotto finito e cioè il sistema modulare per coperture. Al fine di ottenere una buona stabilità meccanica del pannello sandwich è fondamentale controllare l'aderenza tra le skin e il core del pannello. Nel caso studio proposto in questo lavoro la coesione dei tre componenti avviene mediante incollaggio con colle biologiche, l'adozione dell'adesione tramite presso-formatura seppur sia stata considerata in prima istanza è stata abbandonata per il



Figura 168. Stampo core



Figura 169. Stufa utilizzata per asciugare il provino



Figura 170. Pressa utilizzata per la termoformatura

sopraggiungere del condizionamento del valore della densità del core se interessato nuovamente da presso-formatura.

Oltre alla realizzazione del componente core, in una prima fase di studio è stata valutata la possibilità di realizzare con gli stessi materiali un campione con un densità più elevata ($0,8 \text{ g/cm}^3$) e uno spessore molto più ridotto circa 0,8 cm al fine di definire un componente *skin* da utilizzare come pelle protettiva del *core*. Il risultato sperimentale ha evidenziato l'impossibilità di fare aderire fibra e matrice secondo questi rapporti di densità e spessori, la presenza presenta di alcuni vuoti nello strato superficiale (Fig.171) del campione rende impraticabile la scelta di ottenere delle pelli protettive di questo tipo. A tal proposito, si è considerata la possibilità di utilizzare come componente *skin* del pannello sandwich il pannello eco-boards (Fig. 172). Il pannello eco-boards si identifica con le innovazioni di prodotto che interessano i pannelli OSB; questo tipo di prodotto entra in competizione con tutti i pannelli prodotti con derivati del legno; secondo le informazioni fornite dal produttore, il pannelli sono altamente ecologici, infatti dichiara di possedere alcune delle più note certificazioni di prodotto come la Natureplus e Cradle to Cradle¹³¹.

4.2.2 La filiera produttiva dei pannelli eco_boards: componente Skin del pannello coibentante studiato

La produzione e l'uso dei pannelli ECOBoards ha un impatto ambientale positivo, infatti come è stato già osservato nei capitoli precedenti, la paglia consente di ottenere un bilancio sulle emissioni di carbonio negativo; durante la fase di crescita in generale le piante assorbono CO_2 , ma il vantaggio di utilizzare la paglia rispetto alle fibre di legno risiede nella rapidità di crescita dei cereali e soprattutto nella possibilità di non avere costi di trasformazione per la produzione del materiale, la paglia infatti è prodotta in concomitanza con la raccolta delle colture, per il reperimento della materia prima in legno occorre sempre agire con il taglio degli alberi; sebbene si siano attuati delle azioni di tutela e di controllo sulla risorsa boschiva, controllando



Figura 171. Assenza di aderenza fibra-matrice nell'elemento *skin*



Figura 172. Pannello eco-board utilizzato come elemento *skin*

131. La certificazione si basa sui principi di Cradle to Cradle ideati dal Prof. Michael Braungart e da William McDonough e analizza nel dettaglio il singolo prodotto valutando: la salubrità dei materiali, la loro riutilizzabilità dopo l'uso, l'impiego di energia rinnovabile, la gestione della CO_2 e la qualità delle acque nella fase di produzione, l'equità sociale del prodotto.

la deforestazione e disponendo l'uso di legnami certificati (FSC), è auspicabile sostituire del tutto la fibra di legno con altre tipologie di fibre. L'azienda Ecoboard dichiara che una fabbrica Ecoboard con una capacità di 100.000 tonnellate è responsabile di:

- cattura 100.000 tonnellate di CO₂ all'anno
- riduce l'impatto ambientale producendo 200.000 tonnellate di CO₂

in meno ogni anno

- consente di risparmiare circa 400.000 m³ all'anno di alberi

5. VERIFICHE FINALI SUI DIVERSI COMPONENTI DEL PANNELLO SANDWICH PROPOSTO

5.1 Prove di laboratorio attuate sui componenti del pannello sandwich

Come già detto, il lavoro di ricerca si orienta verso la sperimentazione di nuove strutture composite ecosostenibili; in questo capitolo vengono illustrate le verifiche che sono state condotte per definire le caratteristiche dei singoli elementi che compongono il sistema di copertura e il comportamento del sistema in fase di messa in opera. Lo studio e la sperimentazione di nuovi materiali (laminati e strutture composite), si traduce in un'attività finalizzata all'identificazione delle migliori combinazioni -matrici/fibre- per la caratterizzazione del materiale composito da adottare nella struttura sandwich coibentante proposta a monte della ricerca stessa. Al fine di approfondire la conoscenza delle proprietà chimico/fisiche, meccaniche nonché di adesione fra fibra e matrice sono state condotte alcune prove di laboratorio sulle caratterizzazioni meccaniche del "core". Sarebbe stato opportuno verificare il comportamento a compressione del *core* e tuttavia avendo considerato le operazioni da compiersi per mettere in opera il sistema modulare, è stato deciso di valutare la resistenza a flessione dell'elemento *core*; infatti nelle operazioni di manovra da eseguire in fase di posa in opera il pannello sandwich potrebbe essere interessato appunto da sforzi di flessione. Oltre a questa prova, sul

	Energia MJ / kg	Co2 GWP EQV / kg
Paglia	0,000	-1,781
MDI resina	3,009	0,169
Produz	2,392	0,562
Imbal	2,683	0.066
Saldo netto	14,080	-0,985
Tabella 20. LCA Ecoboard Fonte: ECOboards.eu		

componente *core* sono state condotte delle verifiche sulla prestazione termica mediante determinazione del fattore k e di assorbimento dell'acqua ; per i laminati usati come *skin* si sono considerate le caratteristiche di prodotto dichiarate dall'azienda che distribuisce il pannello eco-boards, quale prodotto commerciale individuato come semilavorato da usare nella composizione del pannello sandwich.

In questo capitolo verranno illustrati i risultati delle verifiche sui singoli componenti e sul sistema modulare coibentato oggetto della ricerca; il lavoro sperimentale si compone di due tipologie di analisi:

- prove di laboratorio - fase A-
- simulazioni mediante software - fase B –

I risultati delle prove nella fase A, raggruppano alcune prove di laboratorio condotte sul componente *core* usato per comporre l'elemento coibentante del sandwich del sistema di copertura; nello specifico le prove che sono state eseguite sul componente sono:

- prove a flessione per tre punti (paragrafo 5.1.1);
- determinazione del fattore K (paragrafo 5.1.2);
- determinazione dell'assorbimento d'acqua (paragrafo 5.1.3);

Per quanto riguarda il componente *skin*, la scelta di adottare il pannello eco-borbord consente di valutare le caratteristiche e le prestazioni dichiarate dal produttore.

Le verifiche condotte della fase B, sono caratterizzate dalla valutazione del miglioramento della prestazione energetica di un edificio caso studio interessato da interventi di miglioramento energetico; nello specifico questo lavoro è stato condotto verificando:

- la diffusione di condensa nella stratigrafia di copertura che impiega il sistema studiato come intervento di miglioramento della copertura preesistente;
- il fabbisogno energetico e la classe energetica del sistema edificio che adotta il sistema in copertura;
- la prestazione energetica della medesima copertura coibentata con due specifici prodotti competitors.

5.1.1 Prove meccaniche: prova a flessione per tre punti sul componente *core*

La prova di resistenza a flessione per tre punti è stata eseguita presso i laboratori dell'ICTP di Pozzuoli secondo quanto previsto dalla norma ISO 178 e ASTM D 790; lo scopo della prova è quello di determinare la rigidità del componente; confrontando i risultati della prova (Tab. 21) con quelli relativi alla prova eseguita su un pannello truciolare (Tab.22) si riscontrano notevoli differenze: il Modulo di Young¹³² del campione è quasi 5 volte più basso di quello del pannello truciolare, ciò implica una maggiore flessibilità del campione a quello dei materiali flessibili; tale condizione non vincola la condizione d'uso "componente isolante" disposta per questo l'elemento; il campione "materiale strutturato" ma non strutturale, non deve assolvere a funzioni di resistenza meccanica, il peso del manto di copertura non grava sull'elemento (che comunque è inserito tra le due componenti rigide *skin* /pannello ecoboards) ma sul telaio in legno che accoglie il pannello sandwich.

La prova è stata condotta su dei campioni di forma rettangolare (15x600 mm e spessore 15 mm), la cui densità è di 0.5 g/cm³. I dati di esercizio della macchina di prova - il dinamometro meccanico INSTRON 4505- sono stati:

- velocità di carico di 1 (mm/min),
- temperatura costante di 20°C
- l'umidità di 50 %,



Figura 173. Figura 196 Dinamometro meccanico INSTRON 4505

132. Il modulo di Young o di elasticità esprime il rapporto tra lo sforzo applicato e la deformazione risultante. Un modulo di Young relativamente piccolo indica che il materiale richiede uno sforzo di modesta entità per ottenere una unità di deformazione: il materiale è flessibile. Un modulo grande significa sforzo di notevole entità per ottenere una unità di deformazione: il materiale è 'rigido

Proprietà	Paglia/PLA
Modulo Young	122,40
Sforzo a rottura (MPa)	1,7410
Carico a rottura(KN)	0,590
Def.ne a rottura(mm/mm)	0,0598
Energia punto di rottura(J)	0,835
Spostamento a rottura(mm)	2.474
Tabella 21*. Riepilogo risultati finali del test. elaborazione dell'autore *i valori riportati in questa tabella possono oscillare del 20% a causa dei diversi rapporti materici paglia/PLA che si potrebbero proporre in futuro. In questo caso studio il rapporto percentuale è di 50/50	

Proprietà	Truciolare
Modulo Young	503
Sforzo a rottura (MPa)	10,94
Carico a rottura(KN)	0,3279
Def.ne a rottura(mm/mm)	0,241
Energia punto di rottura(J)	0,1832
Spostamento a rottura(mm)	1,031
Tabella22. Riepilogo risultati finali del test. elaborazione dell'autore	



Figura 174. Immagine dei provini dopo la rottura

5.1.2 Determinazione del fattore K del *core*

L'esigenza di testare il comportamento termico del componente core da inserire nel pannello sandwich ha reso indispensabile il calcolo della conducibilità termica (λ); Attraverso le attrezzature disponibili presso il Centro Interdipartimentale CITTAM dell'Università Federico II di Napoli è stato determinato il fattore K dell'elemento campione. Il fattore K corrisponde alla capacità di attraversamento del flusso di calore, all'interno di una stratigrafia; tale metodo viene solitamente impiegato per calcolare i parametri di una superficie di chiusura verticale del materiale studiato, quindi in questa sede è stato indispensabile inserire il provino in un apposito test cell in legno. Lo strumento con cui sono stati individuati i dati utili alla verifica è il BABUC M (Fig 175); che permette di leggere i seguenti dati :

- Temperatura superficiale della faccia del campione (sia interna al test cell che quella esposta esternamente);
- Temperatura esterna ed interna al test Cell
- Flusso di calore;
- Valore K.

La prima fase della prova è stata condotta effettuando delle misurazioni dei valori a scadenze temporali ben definite, ovvero ogni 10 minuti; la durata complessiva della prova è stata di 1 ora.

Come già detto per poter ottenere dei valori utile; si è reso indispensabile “ forzare” la condizione climatica del provino.



Figura 175. Strumento di analisi Babuc M

Per soddisfare le condizioni di prova il campione è stato inserito in un apposito test cell, cioè un contenitore cubico in legno di dimensioni 40x40x40 cm provvisto di due fori circolari di 20 cm; tali fori permettono l'inserimento di un condotto flessibile che è collegato ad una fonte di calore avente la funzione di produrre una differenza di temperatura tra la faccia del campione posta all'interno del test cell e quella confinante con l'aria esterna. Per ottenere lo scarto di temperatura di 10 °C utile per la verifica è stato collegato il test cell a una fonte di calore; I termometri a contatto sono stati collegati alle superfici del campione in modo tale da poter rilevare sia la temperatura della superficie esterna (Fig. 176) che della temperatura interna (Fig. 177), sempre sulla facciata interna è stata collegata la sonda flussimetria. Mediante un foglio di calcolo Excel (Tab 24) a partire dai dati ottenuti con il rilievo strumentare (Tab.23) è stato elaborato il fattore di trasmissione globale K e il valore di λ .



Figura 176. Acquisizione temperatura superficie esterna campione

Ore	T _i (°C)	T _e (°C)	FLUX (Wm ⁻²)	KGLB (Wm ⁻² K ⁻¹)
16:11	42,14	26,77	266	23,75
16:21	42,75	26,47	368	22,68
16:31	43,83	26,43	386	22,3
16:41	43,56	26,01	353	20,21
16:51	42,41	26,66	390	24,8
17:01	45,25	26,39	375	19,91

Tabella 23. Riepilogo delle misurazioni effettuate con Babuc M



Figura 177. fase di laboratorio, rilievo della temperatura sup interna e sonda flussimetrica sulla faccia interna del provino

Temperatura interna	θ_i	37,51	°C
Temperatura esterna	θ_o	23,66	°C
Flusso	Φ	35,14	W m-2
K globale	Ktot	2,7	W m-2 K-1
Temp.superf. Interna	θ_{s_i}	37,1	°C
Temp.superf.Esterna	θ_{s_o}	36	°C
Spessore provino	s	8	cm
Coefficiente conduttanza unitaria*	α_i	85,70732	W m-2 K-1
Coefficiente conduttanza unitaria	α_o	3,346667	W m-2 K-1
Coefficiente globale di trasmissione termica	Kwall	11,95238	W m-2 K-1
Conduttività del materiale	λ	0,95619	W m-1 K-1

Tabella 24.. Foglio di calcolo *coefficiente di conduttanza unitaria- Indica il flusso di calore che, per effetto combinato dell'irraggiamento e della convezione passa da una superficie all'ambiente circostante, per m^2 di superficie e per °C di differenza tra la temperatura della superficie considerata e la temperatura dell'aria, in questo caso è stato calcolato facendo il rapporto tra il flusso Φ e la differenza tra la Temperatura interna Temp.superf. Interna

Materiale	λ (mK)	Densità (kg/m ³)
Cotone	0,04	20 - 40
Materassino in lino	0,04	30
Canapa	0,045	25
Trucioli di legno	0,05	100
Pannelli in lana di	0,093	400
Fibra di cocco	0,045	70
Pannelli di sughero	0,045	110
Lana di pecora	0,04	25
Cannucciato	0,055	190
Paglia	0,09	340
Pannelli di cellulosa	0,04	85

Tabella 9. Coefficiente di conducibilità termica di materiali isolanti di origine vegetale. (elaborazione dell'autore)

In virtù del fatto che i valori dei materiali isolanti presenti in letteratura (tab.9) sono molto diversi da quello ottenuto si rimanda il lavoro di verifica della conducibilità termica al ulteriori prove di laboratorio, poiché in questa sede tale approfondimento non è stato sviluppato a causa dell'impossibilità di riprodurre il campione secondo le misure standard per la prova di laboratorio.

5.1.3 Prova di assorbimento d' acqua del core

Lo scopo di questa prova è quello di verificare la porosità del materiale; un materiale poroso può essere descritto e caratterizzato attraverso tre proprietà strutturali fondamentali:

- Porosità¹³³,
- Distribuzione porosimetrica,
- Superficie specifica.

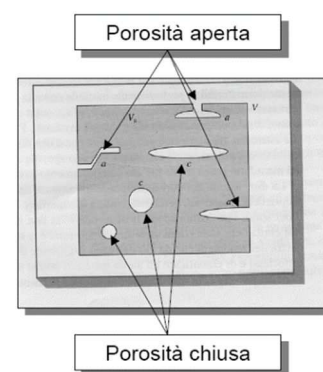


Figura 178. Differenza porosità

133. La porosità è una grandezza scalare ed è genericamente definita come il rapporto tra il volume dei vuoti (pori), V_p ed il volume totale V_m del materiale.

E' fondamentale considerare la porosità del campione perché da questa caratteristica dipendono le sue prestazioni in termini di capacità di coibentazione, di resistenza meccanica e di durabilità. La porosità può essere definita in base al tipo di poro in aperta o chiusa (Fig. 178).

La porosità aperta si ha quando i pori sono collegati alla superficie esterna del materiale, quindi accessibili all'acqua, e che di conseguenza influenzano la permeabilità e la durabilità del materiale.

La porosità chiusa, invece si ha quando i pori sono completamente isolati dalla superficie esterna, in questo caso le proprietà che vengono influenzate sono :

- la densità;
- le proprietà meccaniche;

La porosità si può valutare sia con un metodo di tipo diretto sia con metodo indiretto; il primo è basato sulla misurazione della porosità effettiva del campione con delle prove di laboratorio, il secondo, invece, si realizza attraverso la misura di proprietà fisiche in qualche modo correlabili con la porosità, quali, ad esempio, la densità, la permeabilità al vapore, la velocità di risalita capillare, la capacità di assorbimento, ecc. Nello specifico la fase di prova è stata condotta presso il Dipartimento di Ingegneria chimica, dei Materiali e della Produzione industriale dell'università Federico II di Napoli secondo le modalità della norma UNI EN 1936 (Metodi di prova per pietre naturali); attraverso questa prova si determina la massa volumica reale⁴ e apparente⁵ e la porosità totale aperta del campione.

È opportuno ricordare cosa indicano esattamente tali proprietà:

- la massa volumica reale è il rapporto tra la massa del campione ed il suo volume effettivo, cioè il volume apparente meno il volume dei pori accessibili all'acqua, si esprime in g/cm³;

134. Rappresenta il rapporto tra la massa del provino secco e il suo volume reale, ovvero la differenza tra il volume apparente cioè il volume del solido incluso lo spazio occupato dai pori e il volume dei pori.

135. Rapporto tra la massa del provino secco e il suo volume apparente

136. La pesatura idrostatica consente di calcolare il peso del campione in aria (P1) e il peso (P2) del materiale in esame in acqua; sfruttando cioè il principio di Archimede -un corpo immerso in un fluido riceve una spinta verso l'alto uguale al peso del volume di fluido spostato- si ricava la densità relativa all'acqua del materiale in esame e i due pesi differenti .

Legenda figura: V= volume;

ρ = densità ; g = accelerazione di gravità

$$P1 = V \times (\rho - \rho_{\text{aria}}) g$$

$$P2 = V \times$$

$$(\rho - \rho_{\text{acqua}}) g$$

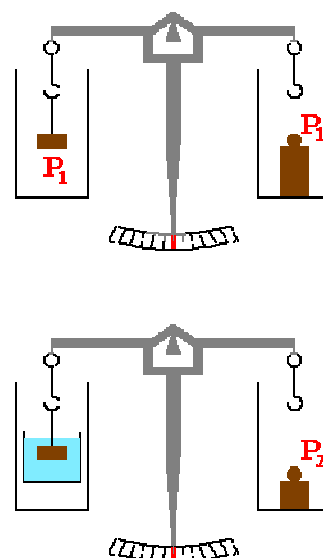


Figura 179. Esempificazione del processo di pesatura del provino

- la massa volumica apparente è il rapporto tra la massa del campione ed il suo volume apparente, è espressa in g/cm³.

- la porosità totale aperta, indica il rapporto tra il volume dei pori accessibili all'acqua ed il volume apparente, cioè il volume determinato considerando la superficie esterna del campione, che si esprime in percentuale;

La determinazione dell'assorbimento dell'acqua in condizione di sottovuoto si ottiene procedendo con le seguenti operazioni:

1. Pesare ogni provino (md) dopo essiccazione e porre i provini in un recipiente "a vuoto" e diminuire la pressione gradualmente e mantenerla costante per 24h al fine di eliminare l'aria contenuta nei pori aperti del provino (Fig.180).
2. Introdurre lentamente acqua demineralizzata a 20°C nel recipiente, mantenere la pressione a 2kPa durante l'introduzione dell'acqua e per le 24h successive (fig.181).
3. Dopo questo tempo occorre riportare il recipiente alla pressione atmosferica e lasciare i provini immersi in acqua per altre 24h a pressione atmosferica (Fig.182).

La prova prevede una fase preliminare di essiccazione dei campioni a 60°C fino al raggiungimento di un valore di massa costante per il campione, e cioè fino a quando la differenza fra due successive pesate è inferiore o uguale allo 0,1%. Dopo aver valutato tale massa "a secco" (P1), il campione viene introdotto in un recipiente in cui, gradualmente, viene creato un vuoto pari a circa 2 KPa mantenuto poi per 24 h. Successivamente nel recipiente viene introdotta lentamente dell'acqua demineralizzata, fino a totale immersione del campione nella stessa, ritornando così a pressione atmosferica. Tale condizione viene poi mantenuta per ulteriori 24 h. Dopo tale periodo, viene effettuata la pesata "idrostatica" del campione, valutando così la massa del campione immerso in acqua (P2). In ultimo, il provino



Figura 180. Fase di laboratorio 1 depressurizzazione provino



Figura 181. Fase di lavoro 2 introduzione acqua

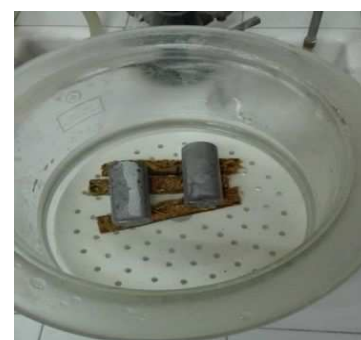


Figura 182. Fase di lavoro 3 deposito provini in acqua per 24 h

viene asciugato rapidamente con un panno umido (allo scopo di rimuovere solo l'acqua superficiale) e viene ancora una volta valutata la sua massa (P3).

Di seguito si riportano i valori letti durante la fase sperimentale di laboratorio (Tab. 25)

		Paglia 1	Paglia 2	Paglia 3	Paglia 4
Peso Secco	m_d (g)	6,456	4,456	3,914	8,368
Peso Idrostat.	m_h (g)	0,921	0,676	0,754	2,827
Peso Saturo	m_s (g)	16,934	12,200	10,936	23,098
Massa Apparente	$m_d / (m_s - m_h)$ (g/cc)	0,403	0,387	0,384	0,413
Massa Reale	$m_d / (m_d - m_h)$ (g/cc)	1,166	1,179	1,239	1,510
Porosità Aperta	$(m_s - m_d) / (m_s - m_h) \times 100$ (%)	65,434	67,199	68,965	72,665
Assorbimento Acqua	$(m_s - m_d) / m_d \times 100$ (%)	162,299	173,788	179,407	176,028

Tabella 25. Riepilogo dei valori sperimentali prodotti durante le prove di laboratorio. Elaborazione dell'autore

Le conclusioni desumibili dalle verifiche presentate nel paragrafo, attestano che la scelta di proporre un elemento sandwich coibentante in cui *core* sia protetto da delle superfici *skin* rigide e resistenti all'umidità è essenziale ai fini di una maggiore resistenza e durabilità dell'elemento stesso; infatti, la prova di assorbimento dell'acqua ha evidenziato che il materiale è molto poroso e quindi un elevato tasso di assorbimento d'acqua, mentre per quanto riguarda la flessibilità del campione, si può considerare trascurabile tale aspetto per due ragioni:

- designazione con strutturale per l'elemento *core* in quanto viene inserito in un telaio strutturale in legno;
- si può migliorare tale aspetto intervento sulla densità del componente.

Si considera valida dunque l'ipotesi compositiva del sistema sandwich e si rinvia a uno sviluppo futuro la verifica a flessione del pannello sandwich dopo aver composto il pannello sandwich; l'aderenza *skin/core* condiziona il comportamento meccanico del



Figura 183. Pesatura provino in acqua

pannello. La verifica della conducibilità termica determinata con la prova di laboratorio consente di determinare un valore di λ di 0,9 quindi si rimanda l'interpretazione di questo dato a ulteriori verifiche.

5.1.4 Principali caratteristiche del pannello *skin*

Per le caratteristiche del componente *skin* non sono state valutate mediante prove di laboratorio poiché si è scelto di utilizzare il prodotto eco-board come *skin* del pannello sandwich.

I dati riferiti alla prestazione meccanica sono stati dichiarati dal produttore e sono riportati in Tabella 26. Il pannello eco-boards dichiara una maggiore resistenza all'umidità rispetto ai pannelli MDF, inoltre sempre secondo quanto dichiarato dal produttore il pannello è esente da formaldeide, tanto da contrassegnare il prodotto con la classe di emissione E0, tuttavia tale indicazione è forviante dal punto di vista normativo perché la -UNI EN 13986- considera le classi di emissione E1 e E2, quindi l'attribuzione di tale "classe di emissione" esprime semplicemente che nel processo produttivo del pannello non sono state impiegate resine o adesivi a base di formaldeide.

La tabella 6 riporta una sintesi delle caratteristiche di un pannello per usi strutturali con lo spessore variabile da 10 a 18 mm, (si ricorda che lo spessore utilizzato nella ricerca è il pannello da 18 mm). Oltre ai dati meccanici, si riportano anche le principali caratteristiche termiche del pannello.

Descrizione	Densità kg/mc.	Spessore mm	Conducibilità	Resistenza	Capacità	Diffusività
			Lambda W(m ² K)	R m ² K/W	J/(kg ² K)	x10 ³ m ² /h
Pannello Eco-Board	400	35	0,065	0,540	2430	5,7
Pannello Eco Board	400	40	0,065	0,620	2430	5,7
Pannello OSB	800	40	0,146	0,270		
Pannello in legno massello		40	0,230	0,170		
Pannello in legno dolce		40	0,120	0,330		
Pannello EcoSystem	379	60	0,101	0,590		
Pannelli in schiume sintetiche	50	40	0,037	0,540	1386	9,7
Pannello in lana minerale	500	40	0,160	0,250	1050	10,9
Pannello in fibro cemento e legno	500	40	0,160	0,250	1050	10,9
Pannello in calcestruzzo alleggerito	700	40	0,220	0,180	1050	26,8

Tabella 27. Confronto delle caratteristiche termiche del pannello eco-boards e altre tipologie di pannelli Fonte: Catalogo eco-boards Italia

Densità (kg/ m ³)	di	630
Modulo di elasticità (Mpa)	di	3500
Modulo di rottura a flessione	di	22
Gonfiore spessore - 24 h(%)	di	15
Tabella 26. Caratteristiche pannello Fonte: www.eco-boards.eu		

5.2 Simulazione mediante software del comportamento del sistema coibentante di copertura

Le verifiche prodotte nella fase B della ricerca, sono finalizzate a definire il beneficio indotto dall'uso del sistema modulare; la metodologia d'indagine è stata supportata dall'utilizzo di alcuni specifici software dell'azienda Acca; nello specifico mediante Termus, è stato effettuato il calcolo della prestazione energetica e classe energetica di un'edificio "campione", mentre con Termus-G è stata verificata la diffusione della condensa nella stratigrafia del sistema coibentante oggetto di studio. Il software Termus opera in conformità delle norme UNI/TS 11300: 2014¹³⁷ e consente di verificare:

- il calcolo dell'energia primaria rinnovabile e non rinnovabile;
- il calcolo e la verifica degli indici di prestazione energetica;
- il calcolo del fabbisogno di acqua calda sanitaria e del fabbisogno energetico correlato;
- il calcolo e alla verifica dei rendimenti degli impianti di climatizzazione invernale ed estiva;
- il calcolo e alla verifica dei rendimenti degli impianti di ventilazione meccanica;
- il calcolo dei consumi per l'illuminazione artificiale;
- il calcolo dei contributi energetici da fonti rinnovabili (Solaretermico, Solare fotovoltaico, Generatori a Biomassa e Pompe di Calore) .

Con Termus -G è stato invece calcolato il rischio alla formazione di condensa (superficiale ed interstiziale) della stratigrafia del pacchetto oggetto di ricerca.

Le fasi della metodologia di verifica sono state condotte in primis verificando la prestazione energetica dell'edificio campione nella condizione dello stato di fatto; a questa fase ha fatto seguito la fase di simulazione del comportamento energetico del caso studio, previa integrazione della stratigrafia di copertura con il sistema studiato. Infine, mediante valutazione comparativa, sono state messe a confronto le prestazioni energetiche dell'edificio coibentato con il sistema oggetto della ricerca e due prodotti competitor. Prima di

137. La norma UNI/TS 11300 è stata aggiornata nel 2014 ; ha come l'obiettivo la determinazione delle prestazioni energetiche degli edifici secondo una metodologia di calcolo univoca. E' suddivisa nelle seguenti quattro parti:

UNI TS 11300-Parte 1, che si occupa della determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale.

UNI TS 11300-Parte 2, che occupa della determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria.

UNI TS 11300-Parte 3 , che i determina il fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva.

UNI TS 11300-Parte 4 – che dispone in materia di energie rinnovabili e di altri metodi di generazione per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria.

descrivere i risultati ottenuti dalla simulazione, occorre fare alcune precisazioni sul software utilizzato per valutare la prestazione energetica dell'involucro dell'edificio "campione"; innanzitutto si è deciso di limitare l'uso degli interventi migliorativi che possono essere adottati per migliorare la prestazione energetica dell'edificio agendo sulla coibentazione della copertura; mantenere invariate le condizioni dell'edificio campione in merito a: stratigrafia delle chiusure verticali, impianti e tipologie d'infisso, per consentire di monitorare e valutare concretamente solo il beneficio indotto dall'uso della sistema oggetto di studio. I dati inseriti nella descrizione della stratificazione studiata non possono essere desunti dalle sperimentazioni di laboratorio e quindi per il componente *core* sono stati considerati i valori della paglia presenti in letteratura; i dati richiesti dal software per calcolare la stratigrafia sono: densità, calore specifico, conducibilità termica, resistenza termica e coefficiente di resistenza al vapore; anche per quanto riguarda la presenza del canale di ventilazione occorre fare una puntualizzazione sulla lettura del dato usato nella valutazione; la presenza del canale di areazione nella stratigrafia di copertura viene stimata considerando lo strato d'aria in condizioni stazionarie e quindi come se fosse in stato di quiete; mentre in condizioni d'uso reale, il flusso che si genera nel canale di areazione è dinamico (paragrafo 3.2.4, vantaggi della ventilazione). Hai fini del risultato finale, si assume tale condizione trascurabile perché le tre tipologie di prodotto comparate sebbene differiscono per la tipologia di materiale coibentante(paglia, sughero e fibra di legno), presentano un canale di area con le medesime dimensioni.

L'edificio assunto come "caso studio" corrisponde alla tipologia edilizia *edificio isolato* – villetta monofamiliare – è sito nel comune di Giuliano in Campagna, e ricade nello spazio periurbano Napoli Est (Fig. 184); La costruzione si sviluppa secondo una geometria rettangolare orientata con l'asse maggiore secondo la direzione Nord-Sud è composto da cinque unità ambientali; la zona notte è esposta totalmente a nord mentre la zona giorno è orientata a sud; la superficie compressiva è di circa 80 mq (Fig. 185); dal punto di vista altimetrico

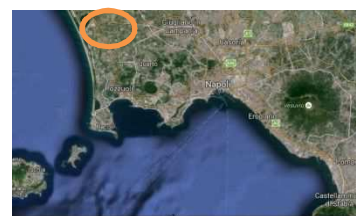


Figura 184. Area studio- Napoli Est

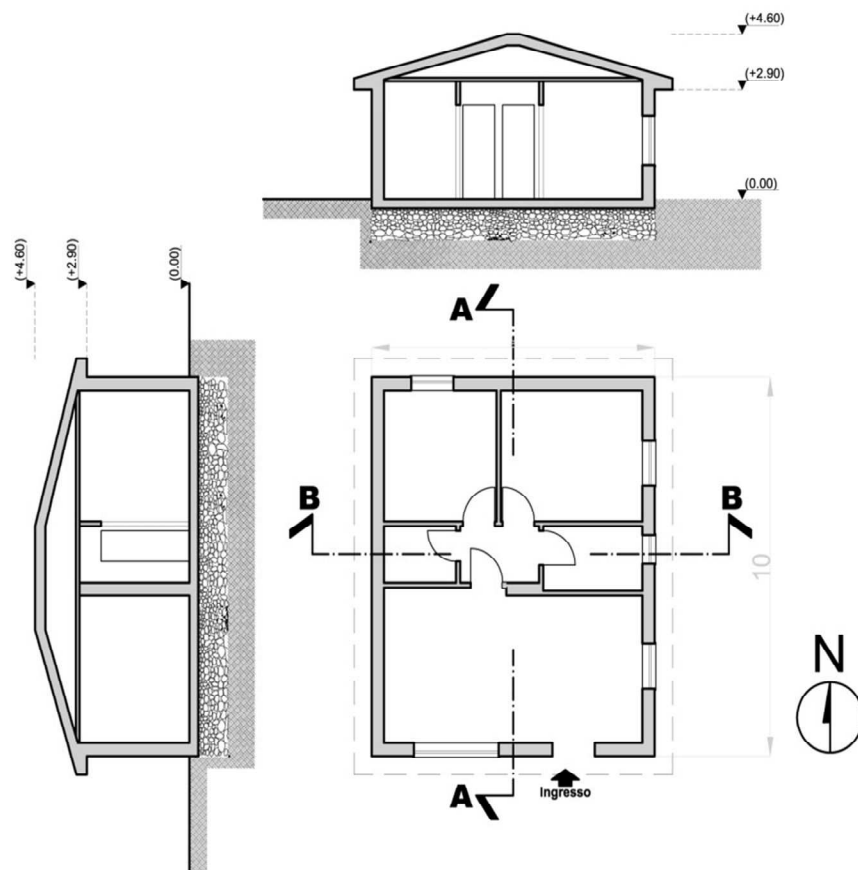
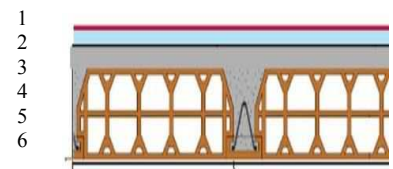


Figura 185. Pianta e sezioni caso studio scala 1: 200

l'edificio si presenta con un solo livello fuori terra e una copertura a quattro falde che raggiunge la quota di colmo a 4,60 m; le falde hanno una pendenza del 30 % e sono composte da: un solaio composto da laterocementizio, una soletta c.a., un canale di areazione e lo stato di finitura in tegole (Fig. 187); dal punto di vista dello spazio sottotetto la falda risulta sprovvista di un solaio sottotetto in quanto le unità abitative sono limitate da un controsoffitto in pannelli prefabbricati. tale condizione ha favorito la fase di analisi con il software Termus perché nella definizione del vano riscaldato è stato possibile inserire direttamente il volume delimitato dal solaio di calpestio e dall'estradosso della falda inclinata (il solaio sottotetto è realizzato con una controsoffittatura in cartongesso e quindi irrilevante per l'assegnazione della funzione "superficie di confine" da inserire



Figura 186. Edificio oggetto di verifica



1. Tegola 1 cm;
2. Intercapedine d'areazione 5 cm;
3. Foglio isolante 0,2 cm;
4. Calcestruzzo 4 cm;
5. Blocco laterizio 24 cm;
6. Intonaco 2 cm.

Figura 187. Stratigrafia solaio di copertura "stato di fatto", spessore compressivo 36,5 cm

nel software). Le chiusure verticali si compongono di una muratura con doppio stato di laterizio, materiale isolante e canale di areazione (Fig. 188), mentre le ripartizioni interne, sono realizzate con tramezzature in laterizio dello spessore di 8 cm intonacate su entrambi i lati della parete.

Nella condizione dello “stato di fatto” l’edificio campione raggiunge la classe energetica D e presenta un indice di potenza energetica globale pari a 104.3440 kWh/m2annuo, ciò significa che è consigliabile intervenire con degli interventi di miglioramento che come già ricordato in precedenza possono essere molteplici¹³⁸, ma in questa sede sono stati limitati alla coibentazione della chiusura superiore; nella fase di rilievo il valore di trasmittanza termica raggiunto dal solaio di copertura (Fig. 187) è di 1,301 W/m²K; tale valore è notevolmente al di sotto degli standard minimi richiesti per le coperture (Tab.28), le principali ragioni di un valore così elevato sono da imputarsi proprio all’assenza dello materiale isolante nella stratigrafia.

5.2.1 Verifica della condensa interstiziale mediante il software TermusG

La scelta di impiegare la paglia come componente isolante del sistema di copertura richiede in modo prioritario l’analisi termoigrometrica della stratigrafia di copertura così progettata, la presenza di umidità e condense, già pericolose per la stabilità e la prestazione dei materiali isolanti, diventa un problema ancora più delicato se si impiega materiale organico come la paglia; di seguito si riporta la stratigrafia oggetto di verifica.

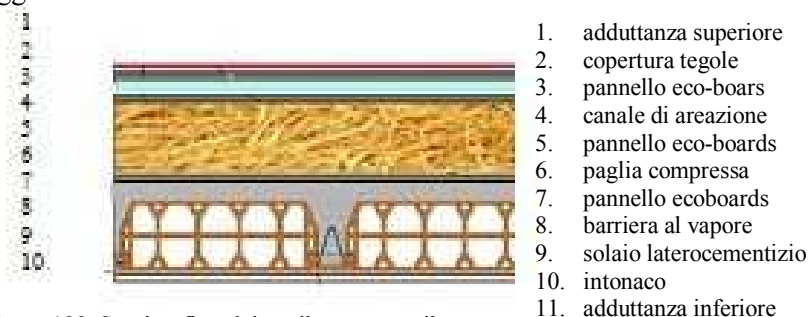
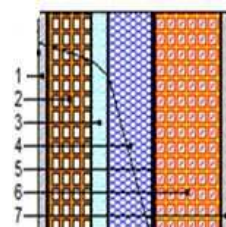


Figura 189. Stratigrafia solaio coibentato con il pannello straw_wind

STRAW_WIND *Ventilated roof*
Sviluppo e sperimentazione di un sistema/componete
per coperture ventilate ecosostenibili
partendo dalla conversione “by products” della paglia



1. Intonaco 1,5 cm;
2. Mattone forato 8 cm;
3. Canale d’areazione 5 cm;
4. Polistirene 8 cm;
5. Malta di calce 5 cm;
6. Mattone semipieno 12 cm;
7. Malta di calce 2 cm.

Figura 188. Stratigrafia parete esterna, spessore compressivo 35 cm

138. Interventi migliorativi::
- Isolamento termico pareti esterne a cappotto
 - Isolamento termico copertura
 - Sostituzione infissi
 - Sostituzione Caldaia
 - Sostituzione sistemi di illuminazione
 - Sostituzione elettrodomestici
 - Installazione di impianto solare termico per acs
 - Installazione di impianto solare fotovoltaico

	311/06	90/13 (2015)	90/13 (2021)
A-B	0,38	0,38	0,35
C	0,38	0,36	0,33
D	0,32	0,3	0,26
E	0,30	0,25	0,22
F	0,29	0,23	0,20
Tabella 28. Valori trasmittanza copertura			

Il verificarsi della condensazione soprattutto quando è di tipo interstiziale rappresenta un fenomeno indesiderato ed è pertanto opportuno verificare se e quando ciò possa avvenire. La corretta progettazione viene verificata con il diagramma di GLASER. Quando il vapore acqueo condensato non riesce ad evaporare o tale operazione avviene in tempi lunghi, l'esposizione del materiale all'acqua può generare l'imbibizione del materiale stesso con la conseguente formazione di muffe e spore che nel caso della paglia sono altamente negative perché producono il degrado della materia prima. Un rimedio contro la condensa interstiziale è rappresentato da una corretta ventilazione e dall'utilizzo di materiali idonei disposti in strati FUNZIONALI corretti. In questa sede la verifica della condensa è stata condotta sulla stratigrafia impiegando il software termus-G. Nel caso specifico del pannello modulare sono state fatte delle considerazioni sulla possibilità di variare gli spessori dei diversi strati; in prima istanza è stato valutato il comportamento della stratigrafia con un componente con il *core* alto 8 cm, e in seconda istanza si è considerato lo spessore di 22 cm; di seguito si riporta la tabella contenente i dati relativi allo spessore del *core* di 8 cm.

N.	DESCRIZIONE STRATO (da superiore a inferiore)	s [mm]	lambda [W/mK]	C [W/m²K]	M.S. [kg/m²]	P<50°10¹² [kg/m²Pa]	C.S. [J/kgK]	R [m²K/W]
1	Adduttanza Superiore	0		25.000			0	0.040
2	copertura in tegole	10	0.470	47.000	16.00	193.000	1000	0.021
3	Pannello EcoBoards	18	0.065	3.611	11.34	9.650	2430	0.277
4	Intercapedine d'aria	80	0.290	3.625	4.00	193.000	1000	0.276
5	Pannello EcoBoards	18	0.065	3.611	11.34	9.650	2430	0.277
6	Paglia	80	0.099	1.238	30.32	19.897	2400	0.808
7	Pannello EcoBoards	18	0.065	3.611	11.34	9.650	2430	0.277
8	Fogli di materiale sintetico.	2	0.230	115.000	2.20	0.010	900	0.009
9	Soletta laterocemento da 25	250		2.198	500.00	193.000	1000	0.455
10	Malte di gesso per intonaci/pannelli con inerti - mv.600.	20	0.290	14.500	12.00	18.000	1000	0.069
11	Adduttanza Inferiore	0		10.000			0	0.100
RESISTENZA = 2.808 m²K/W			CAPACITA' TERMICA AREICA (cup) = 41.368 kJ/m²K			TRASMITTANZA = 0.383 W/m²K		
SPESSORE = 488 mm			CAPACITA' TERMICA AREICA (inf) = 66.388 kJ/m²K			MASSA SUPERFICIALE = 687 kg/m²		
TRASMITTANZA TERMICA PERIODICA = 0.01 W/m²K			FATTORE DI ATTENUAZIONE = 0.82			SFASAMENTO = -1.26 h		
s = Spessore dello strato; lambda = Conduttività termica del materiale; C = Conduttanza unitaria; M.S. = Massa Superficiale; P<50°10¹² = Permeabilità al vapore con umidità relativa fino al 50%; C.S. = Calore Specifico; R = Resistenza termica dei singoli strati; Resistenza - Trasmissione = Valori di resistenza e trasmissione reali; Massa Superficiale = Valore calcolato come disposto nell'Allegato A del D.Lgs.192/05 e s.m.l.								

Tabella 23. Riepilogo dati prodotti con il software termus G spessore paglia 8 cm

Il valore della trasmittanza termica ottenuto con la stratigrafia analizzata $-0,383 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ non soddisfa lo standard normativo del D.M. 26 Giugno 2015 che per la zona climatica richiede un valore minimo di $0,34 \text{ W/m}^2 \text{ K}$; per poter avere un minore valore di U si propone un *core* con lo spessore di 22 cm che consente di ottenere un valore di $0,266 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ (Tab. 24)

N.	DESCRIZIONE STRATO (da superiore a Inferiore)	s [mm]	lambda [W/mK]	C [W/m²K]	M.S. [kg/m²]	P<50*10 ⁻⁴ [kg/msPa]	C.S. [J/kgK]	R [m²K/W]
1	Adduttanza Superiore	0		25.000			0	0.040
2	copertura in tegole	10	0.470	47.000	16.00	193.000	1000	0.021
3	Pannello EcoBoards	18	0.065	3.611	11.34	9.650	2430	0.277
4	intercapedine d'aria	50	0.290	5.800	2.50	193.000	1000	0.172
5	Pannello EcoBoards	18	0.065	3.611	11.34	9.650	2430	0.277
6	Paglia	220	0.099	0.450	83.38	19.897	2400	2.222
7	Pannello EcoBoards	18	0.065	3.611	11.34	9.650	2430	0.277
8	Fogli di materiale sintetico.	2	0.230	115.000	2.20	0.010	900	0.009
9	Soletta laterocemento da 25	250		2.198	500.00	193.000	1000	0.455
10	Malte di gesso per intonaci/pannelli con inerti - mv.600.	20	0.290	14.500	12.00	18.000	1000	0.069
11	Adduttanza Inferiore	0		10.000			0	0.100
RESISTENZA = 3.818 m²K/W		CAPACITA' TERMICA AREICA (cup) = 41.383 kJ/m²K				TRASMITTANZA = 0.266 W/m²K		
SPESSORE = 808 mm		CAPACITA' TERMICA AREICA (int) = 66.479 kJ/m²K				MASSA SUPERFICIALE = 888 kg/m²		
TRASMITTANZA TERMICA PERIODICA = 0.00 W/m²K		FATTORE DI ATTENUAZIONE = 0.00				SFASAMENTO = 8.62 h		
s = Spessore dello strato; lambda = Conduttività termica del materiale; C = Conduttanza unitaria; M.S. = Massa Superficiale; P<50*10 ⁻⁴ = Permeabilità al vapore con umidità relativa fino al 50%; C.S. = Calore Specifico; R = Resistenza termica dei singoli strati; Resistenza - Trasmittanza = Valori di resistenza e trasmittanza reali; Massa Superficiale = Valore calcolato come disposto nell'Allegato A del D.Lgs.192/05 e s.m.l.								

Tabella 24. Riepilogo dati prodotti con il software termus G spessore paglia 22 cm

5.2.1 Simulazione del comportamento termico di un edificio coibentato con il Pannello STRAWind e alcuni competitor

In questo paragrafo vengono riportati i risultati della simulazione della prestazione energetica dell'edificio campione in riferimento all'uso di tre tipi di sistemi di coibentazione.

Alla stratigrafia dello "stato di fatto" si aggiungono i seguenti pacchetto coibentanti/ventilati:

1. straw_wind, il sistema progettato in questo studio, definito con il pannello sandwich in paglia (Fig. 190);
2. isovent bio, il sistema composto dal coibentante in sughero (Fig.191);
3. airek eco wood, il sistema che utilizza il coibentante in la fibra di legno (Fig.192);

La verifica energetica eseguita con software Termus sulla tipologia 1



Figura 190. Schematizzazione del sistema straw_wind



Figura 191. Pannello modulare coibentante isovent bio



Figura 192. Pannello modulare coibentante airek eco wood,

consente di ottenere la classe energetica A2 e un EP gl, nren paria a 44, 0490 kWh/m²anno; il sistema isovent bio raggiunge la classe energetica B e un valore di EP gl, nren pari a 69.2180 kWh/m²anno; infine il sistema airek eco wood che come per il pannello straw_wind ottiene la classe energetica A2, cioè la stessa del pannello oggetto di studio, e un valore di EP gl, nren leggermente inferiore (42,726 kWh/m²anno). Nella valutazione si è cercato di utilizzare gli spessori dei prodotti prossimi a quelli ipotizzati per nel sistema studiato; per i prodotti commerciali isovent bio e aireck ecowood si è fatto riferimento alle schede di prodotto di seguito allegate; mentre per le caratteristiche del sistema oggetto di studio, l'impossibilità di reperire tutti i dati richiesti dal software quali: calore specifico, massa volumetrica, conduttività, resistenza al vapore acqueo, sono stati desunti dalla letteratura approssimando i valori più verosimili alle caratteristiche ipotizzate per gli elementi in uso nel sistema.

ISOVENT BIO (SUGHERO NATURALE BIONDO)



Sistema termoventilato composto da un pannello in sughero accoppiato ad pannello in EUROSTRAND OSB a norma EN 300.

DATI TECNICI TOT PANNELLO

Lunghezza (mm)	1000
Larghezza (mm)	1000
Spessore (mm) Coibente	40/40 - 50/40 - 50/50 - 60/40 - 60/50 - 60/60
Spessore (mm) OSB2	10 ≤ 18 - 10 ≤ 25
Spessore (mm) OSB3	11 ≤ 18 - 10 ≤ 25
Densità (Kg/m³)	140
Peso (Kg/m²)	

CARTTERISTICHE DEL PANNELLO IN SUGHERO

Conducibilità termica (W/mk)	0,043
Resistenza alla compressione (Kg/cm²)	5
Permeabilità al vapore (μ)	10 _13
Reazione al fuoco: Classe	2

CARTTERISTICHE DEL PANNELLO OSB

Massa Volumica (Kg/m³)	EN 323	da 580 a 660
Permeabilità al vapore (μ)	DIN 52615	> 2
Conducibilità termica (W/mk)	DIN 52612	0,13



Via dell'Artigianato, 25 - Ponte di Piave - Treviso - Italy Tel. +39 0422 858070 - Fax +39 0422 759654
www.termoisolanti.com - info@termoisolanti.com

AIREK ECOWOOD



AIREK ECO WOOD è un pannello ventilato adatto a garantire il rispetto del D. Lgs. 311/06 sul risparmio energetico degli edifici. È costituito da un pannello in fibra di legno (D. 190 kg/mc), uno strato di ventilazione e un pannello OSB. Realizzato interamente con materiali naturali, è indicato per coperture a falda inclinata di sottotetti abitati; viene bloccato alla superficie mediante due fissaggi meccanici ogni metro quadro idonei alla copertura ed è garantito a normativa di Legge. Tale sistema assicura un adeguato isolamento sia acustico che termico, garantendo un elevato risparmio energetico nei periodi invernali ed un ottimo rinfrescamento nei periodi estivi.

DATI TECNICI TOT PANNELLO

Lunghezza (mm)	1200
Larghezza (mm)	600
Spessore (mm)	130 - 150 - 170 - 190 - 210 - 230 - 250
Densità (Kg/m³)	190
Peso (Kg/m²)	24,7 - 28,5 - 32,3 - 36,1 - 39,9 - 43,7 - 47,5
Spessore (mm) OSB	9,5 - 12
Spessore (mm) Fibra di legno	80 - 100 - 120 - 140 - 160 - 180 - 200
Spessore (mm) Canale di ventilazione	40

CARATTERISTICHE DEL PANNELLO IN FIBRA DI LEGNO

	NORMA	190 Kg /m ³
Conducibilità termica (W/mk)	EN 12667	0,042
Resistenza alla compressione (kPa)	EN 826	70
Permeabilità al vapore (μ)	EN 12086	5
Reazione al fuoco: Euroclasse	EN 13501/1	E

CARATTERISTICHE DEL PANNELLO OSB

Massa Volumica (Kg/m³)	EN 323	600
Permeabilità al vapore (μ)	DIN 52615	300 - 500
Conducibilità termica (W/mk)	DIN 52612	0,12



35011 Campodarsego (PD) - Via Antoniana, 108/A- Tel 0039 049 9202401
Fax 0039 049 5564468 www.re-pack.it email. info@re-pack.it

STRAW_WIND *Ventilated roof*

Sviluppo e sperimentazione di un sistema/componente
per coperture ventilate ecosostenibili
partendo dalla conversione "by products" della paglia

5.2.3 Analisi comparativa delle prestazioni termiche di un caso studio con diverse soluzioni coibenti

Lo studio comparativo con altre soluzioni di prodotto è indispensabile se si vuole collocare sul mercato il sistema progettato in questa ricerca. L'analisi della prestazioni energetica dell'edificio mediante diverse soluzioni di prodotto coibentati e ventilate è stata condotta con l'intenzione di valutare il grado di soddisfacimento perseguibile con l'applicazione proposta in questo studio. Gli aspetti considerati e confrontati sono stati in primis la verifica della classe energetica del prodotto, inoltre è stato considerato il comportamento del sistema nella condizione estiva e nella condizione invernale. Si riportano qui di seguito un confronto tra le caratteristiche delle tre soluzioni oggetto d'indagine.

Solaio	Spessore cm	Sfasamento h	Trasmittanza W/m ² K	Resistenza m ² K/ W	Trasmittanza termica periodica W/m ² K
Straw_wind	60,8	8,62	0,266	3,430	0,03
Isoventbio	43,7	10,44	0,463	2,162	0,06
aireckecowood	57,4	21,07	0,199	5,035	0,01

Tabella 25. Riepilogo delle caratteristiche delle stratigrafie analizzate con termus

In sintesi, dall'analisi delle tre soluzioni indagate si può affermare che: la fibra di paglia e la fibra di legno raggiungono una classe energetica più alta del prodotto in sughero (Tab.10) e quindi sono soluzioni più soddisfacenti, tuttavia gli spessori delle soluzioni Straw_wind e aireckecowood sono 4 volte superiori rispetto allo spessore del coibente in sughero del pannello Isoventbio, questa condizione influenza notevolmente il peso unitario del prodotto; il peso unitario del sistema Straw_wind (78 kg/mq) potrebbe essere un fattore di criticità nei criteri di scelta del prodotto, infatti a parità di classe energetica il sistema Aireckecowood è meno pesante del sistema Straw_wind. Si tende escludere dal confronto il pannello Isoventbio perché gli altri due prodotti presentano delle caratteristiche più affini sia in termini di peso del pannello che in termini di spessori;

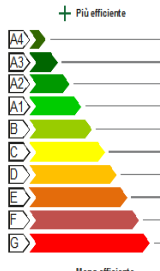









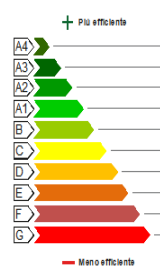
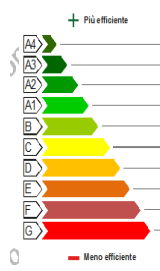












1. straw_wind		Spessore copertura: 63, 6 cm Peso :78 kg/mq						
	<div>EDIFICIO A ENERGIA QUASI ZERO</div> <div>CLASSE ENERGETICA</div> <div>A2</div> <div>EP_{gl,nren} 44,0490 kWh/m²/anno</div>	<table><tr><th>INVERNO</th><th>E STATE</th></tr><tr><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td></tr></table>	INVERNO	E STATE				
INVERNO	E STATE							
								
								
2.isovent bio		Spessore copertura: 48,2 cm Peso:18kg/mq						
	<div>EDIFICIO A ENERGIA QUASI ZERO</div> <div>CLASSE ENERGETICA</div> <div>B</div> <div>EP_{gl,nren} 89,2180 kWh/m²/anno</div>							
3. aireck eco wood		Spessore copertura: 62,4 cm Peso: 47,5 Kg/mq						
	<div>EDIFICIO A ENERGIA QUASI ZERO</div> <div>CLASSE ENERGETICA</div> <div>A2</div> <div>EP_{gl,nren} 42,7260 kWh/m²/anno</div>	<table><tr><th>INVERNO</th><th>E STATE</th></tr><tr><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td></tr></table>	INVERNO	E STATE				
INVERNO	E STATE							
								
								

Figura 26. Tabella di riepilogo dei fattori considerati nel confronto.

6. Conclusioni e prospettive future

Il presente lavoro di tesi si pone all'ambito di ricerca dei materiali e sistemi innovativi che impiegano le fibre naturali della paglia nel comparto edilizio. Lo scopo della ricerca è quello di comprendere il potenziale d'uso delle biomasse vegetali in edilizia, ma soprattutto quello di delineare un nuovo scenario d'uso della paglia che, attraverso nuove applicazioni e nuove tecnologie, può contribuire alla definizione di un comparto edilizio più sostenibile. L'elaborazione dello stato dell'arte degli isolanti naturali ha evidenziato l'ampia diffusione delle fibre vegetali come soluzioni merceologiche a ridotto impatto ambientale. Attraverso un lavoro di inventariato e di schedatura di alcune di queste fibre sono stati osservati i punti di forza e i punti di debolezza di questa tipologia di "materiale".

Le fibre vegetali, in qualità di prodotti eco-sostenibili e bio-compatibili, trovano riscontro applicativo anche negli interventi di qualificazione delle coperture esistenti, ma ai benefici ambientali ed energetici indotti dall'impiego dei materiali secondo la modalità coibentante sotto-tegola fanno seguito alcune riflessioni sull'eccessiva sensibilità all'umidità del materiale fibroso. Secondo lo studio condotto da D' Orazio e Dogana, gli isolanti termici fibrosi di origine vegetale, possono generare problemi di igroscopicità e alterare la prestazione termica dei pacchetti di copertura che in base alla variazione dell'umidità manifestano una capacità di assorbimento dell'acqua variabile¹³⁸ (Fig. 193). Dunque, affinché l'isolante fibroso garantisca la stessa prestazione termica di quello sintetico occorre incrementare lo spessore di quello naturale (di circa solo 5-6 cm rispetto a quello sintetico ed infine nel caso l'UR% supera il 70%), per ottenere dal materiale naturale la stessa prestazione di quello sintetico occorre raddoppiare gli spessori degli isolanti vegetali.

L' aspetto più interessante del lavoro di D'Orazio e Dogana riguarda l'approfondimento condotto sul beneficio che un canale di ventilazione può produrre in una stratigrafia di copertura che impiega gli isolanti vegetali per la coibentazione. L'acquisizione di queste

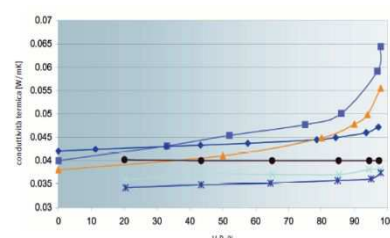


Figura 193. Relazione UR% e conducibilità termica materiali isolanti
Fonte : D' Orazio e Dogana

Umidità relativa %	Conducibilità materiale	Spessore richiesto per avere la stessa U tra i materiali di natura sintetica e naturale
<30	Crescita lineare	Stessi spessori
30-70	Crescita lineare	Spessori naturali maggiorati di 5-6 cm
>70	Crescita esponenziale	Spessori raddoppiati

Tabella 27. Riepilogo relazione UR% e spessori isolanti.
Elaborazione dell'autore.
Fonte : D' Orazio e Dogana

138 .Gli autori, mediante prove di laboratorio hanno verificato che la capacità di assorbimento delle fibre vegetali è 10-15 volte superiore rispetto a quella degli isolanti non naturali. Definendo dei range sul rapporto UR%- λ si possono riportare delle osservazioni sugli spessori da impiegare nelle diverse condizioni di UR%. Per valori di UR inferiore a 30%, gli spessori utili per i materiali di origine naturale e sintetici sono gli stessi; per valori compresi tra 30-70%,

informazioni è stata utilizzata nella ricerca per definire il concept del sistema oggetto di studio. Il sistema STAWind è progettato e assemblato utilizzando tre semi-componenti, cioè telaio, coibentante e ventilazione. Dall'analisi di mercato è possibile collocare il sistema nella categoria di prodotto dei sistemi modulari per coperture ventilate.. Le soluzioni “alternative” coibentanti/ventilate già diffuse (pannelli modulari in sughero, fibra di legno e lana di pecora) rappresentano le sfide dell'innovazione tecnologica e quindi definiscono anche per la soluzione di prodotto uno scenario d'uso innovativo e sostenibile; inoltre, se il sughero e la fibra di legno sono materie prime che entrano in competizione con i prodotti sintetici per la naturalità del prodotto, la scelta di rivalorizzare la fibra di paglia mira anche a migliorare la prestazione energetica degli edifici rendendo ancora più efficiente la gestione delle risorse rinnovabili locali.

Recuperare e conferire plusvalore allo scarto agricolo, può rappresentare un'occasione di riscatto per alcune aree del Mezzogiorno che fondano la propria economia sull'attività agricola. Inoltre, questo approccio sperimentale consente di operare in linea con alcune esperienze di ricerca estere.

Dal punto di vista dell'analisi delle prestazioni del sistema oggetto di studio, in questa sede è stato possibile analizzare in laboratorio il comportamento dei singoli componenti. Sarebbe utile approfondire lo studio sull'aderenza tra gli elementi *skin* e *core* del sandwich, nonché definire la resistenza meccanica complessiva del pannello coibentante infatti, l'aderenza tra i componenti agisce sul comportamento meccanico dell'elemento stesso. La valutazione delle caratteristiche termiche del sistema è stata effettuata estrapolando e mettendo a confronto le prestazioni ottenute dall'analisi della stratigrafia di copertura mediante il software termus; il dato “teorico” ricavato, è stato utile per la valutazione comparativa con i prodotti competitor ma non può essere assunto come dato univoco delle prestazioni del sistema, poiché per avere dei dati empirici occorre fare delle prove di laboratorio sul campione; Alcune prove, già designate come sviluppo

futuro della ricerca mediante il supporto dei laboratori dell'università di Reggio Calabria possono essere condotte mediante dei cicli termici con la hot-box, che permettono di ottenere dei dati sperimentali sul comportamento del provino durante un'escursione da 80° a -20°, oppure presso lo stesso laboratorio, è possibile verificare il comportamento del sistema rispetto all'esposizione solare, la condizione di prova consente di simulare il percorso solare definendo l'ora e quindi l'angolo di inclinazione specifico della radiazione solare, questo tipo d'indagine potrebbe risultare molto utile per comprendere il comportamento del sistema rispetto alla possibile esposizione allo scambio termico per irraggiamento. Altri approfondimenti sulla qualità del prodotto coibentante paglia/pla potrebbero essere supportati dall'analisi merceologica del campione prodotto presso il CNR. Questo tipo di analisi potrebbe prospettare l'effettivo scenario di fine vita del materiale composito in questo studio. Sull'argomentazione relativa alla fattibilità tecnica degli elementi che compongono il sistema, si prospetta una filiera di prodotto italiana del pannello eco-boards, quindi, l'orientamento dello studio verso la valorizzazione delle risorse locali trova un riscontro in uno scenario produttivo già strutturato; Inoltre, tale condizione potrebbe far riformulare anche la scelta di progetto del *core* posto in opera nel pannello sandwich sostituendo il materiale composito paglia/pla (componente *core* del pannello sandwich coibentante) con un pannello multistrato di eco-boards.

Bibliografia

Innovazione del prodotto sostenibile e materiali edili naturali

- Barberio G.; Peronaci M.; Morabito, R., *Green economy, eco-innovazione e sostenibilità dei sistemi produttivi*, in Energia, ambiente e innovazione, 2014, 5: 4-14.
- Conti C., Rossetti M. “I materiali isolanti. Invisibili alla ribalta”, in Costruire n. 293, 2007. pp. 110-115
- Franchino R., (a cura di), *Strumenti e metodi per il controllo della qualità del costruire*. Alinea Editrice, 2005.
- Franco M., *I parchi eco industriali. Verso una simbiosi tra architettura, produzione e ambiente*. Franco Angeli, 2005.
- Fassi A., Maina L., *L'isolamento ecoefficiente: guida all'uso dei materiali naturali*, Milano, Edizione, 2006.
- Gangemi V., (a cura di), *Riciclare in architettura : scenari innovativi della cultura del progetto*, Clean , Napoli, 2004.
- Gaspari, J., Trabucco, D., Zannoni, G., *Involucro edilizio e aspetti di sostenibilità*. Franco Angeli, Milano, 2010.
- Lavagna M., *Life Cycle Assessment in edilizia: lo stato dell'arte in Italia. LA RETE ITALIANA LCA: PROSPETTIVE E SVILUPPI DEL LIFE CYCLE ASSESSMENT IN ITALIA*, 2011
- Losasso M., *Percorsi dell'innovazione : industria edilizia, tecnologie, progetto*. Clean, Napoli, 2010.
- Manzini E. , Vezzoli C., *Lo sviluppo di prodotti sostenibili. I requisiti ambientali dei prodotti industriali*, Maggioli, Rimini, 1998.
- Mazzucchelli E. S. *Edifici ad energia quasi zero-Materiali, tecnologie e strategie progettuali per involucri e impianti innovativi ad alte prestazioni*, Maggioli Editore, Rimini, 2013
- Mc donough W., Breaungart M., *Dalla culla alla culla* Blu Edizioni, 2013.
- Monticelli C., *Life Cycle Design in Architettura*, Maggioli Editore, 2013.
- Mussi, G., *Gestire l'innovazione tecnologica*. Edizioni Nuova Cultura, 2011
- Passaro, A., *Progetto Abitare verde: ricerche, progetti e tecniche per l'ecocompatibilità ambientale*. Giannini Editore, Napoli, 2000.
- Passaro A. (a cura di), *La produzione industriale eco-orientata per l'edilizia*, Luciano Editore, Napoli, 2007.
- Sasso U., *ISOLANTI SI, ISOLANTI NO*, secondo BIOARCHITETTURA Alinea Editrice, 2003.
- Sinopoli, N., Tatano V., *Sulle tracce dell'innovazione tra tecniche e architettura*. Franco Angeli, Milano, 2002.
- Manzini E., Vezzoli C., *Lo sviluppo di prodotti sostenibili. I requisiti ambientali dei prodotti industriali*, Maggioli, Rimini, 1998.
- Torricelli, M. C., Gargari, C., & Palumbo, E. Ecolabel per gli edifici del Mediterraneo, in Costruire in laterizio, 133, 2010
- Innovazione e sostenibilità nel settore edilizio. Secondo Rapporto dell'Osservatorio congiunto Fillea Cgil – Legambiente

Materiali a basso impatto ambientale: la paglia

- Atkinson C., Energy assessment of a straw bale building. Unpublished MSc Thesis, University of East London, 2008.
- Barbara, J. *Costruire con le balle di paglia: manuale pratico per la progettazione e la costruzione*. Terra Nuova Edizioni. 2007
- Berdonello A.R., Stra(W)isolami. Analisi tecnologica di edifici isolati con balle di paglia. Tesi PhD, Università di Torino 2014
- Bosia, D. *Tetti in paglia nel Parco del Marguareis e nel Parco delle Alpi Marittime*, in ARCHALP, 2014 n 7, pag 68-71.
- Brojan, L., Petric, A., & Clouston, P. L. *A comparative study of brick and straw bale wall systems from environmental, economical and energy perspectives*, in Journal of Engineering and Applied Science, 2013, 8, pag. 920-926.
- Conti, L. et al. STUDIO DI FILIERE AGRICOLE SOSTENIBILI PER LA PRODUZIONE DI BALLE DI PAGLIA DA COSTRUZIONE – RISULTATI PRELIMINARI. L'edilizia rurale tra sviluppo tecnologico e tutela del territorio, 2013, 239.
- Francese D., et al. *Employing Second Matter from Agricultural Sector in Architecture: A Comparison Between the Italian and Romanian Situation*, in: Progress in Clean Energy, Volume 2. Springer International Publishing, 2015. p. 369-383.
- Mastrangelo, N., et al. "Bioclimatic Performances of Traditional Straw Construction in Italy and in Portugal", ATINER'S Conference
- Franzin R., *I casoni dalle lagune di Caorle e Bibione a Cavarzere*, Provincia di Venezia, nuova dimensione, Portogruaro, 2004
- Minke G., Mahlke F., *Building with straw: design and technology of a sustainable architecture*. Birkhauser, 2005.
- Lawrence M., Heath A., Walker P., *Determining moisture levels in straw bale construction*, in Construction and Building Materials, 2009, 23.8: 2763-2768.
- Lawrence M., Heath A., Walker P., *Monitoring of the Moisture Content of Straw Bale Walls*, in Sustainability in Energy and Buildings. Springer Berlin Heidelberg, 2009. p. 155-164.
- Lawrence, M., Heath, A. and Walker, P. *The impact of external finishes on the weather resistance of straw bale walls*, in: 11th International Conference on Non-conventional Materials and Technologies, NOCMAT 2009. University of Bath.
- Lechi G., *La prefabbricazione utilizzare l'inutilizzato*, in Il progetto sostenibile n 30, 2011 , pag 38-43

Componenti di copertura coibentanti

- Arbizzani, E. *Tecnologia dei sistemi edilizi. Progetto e Costruzione*. Maggioli Editore, 2011.
- AA.VV.. *Manuale di progettazione edilizia* (Volume IV), Hoepli, Milano, 1999.
- Conti C., Rossetti M., Padovan "Ruolo dell'isolamento termico nel contenimento dei consumi energetici. Evoluzione e innovazione dei materiali e sistemi di isolamento termico in edilizia", in Ambiente Risorse Salute n .118, 2008, pp-6-16

- D' Orazio, Dogana (2007). Comportamento igrometrico delle coperture in laterizio, "Coperture oggi" , numero 116, Marzo/Aprile, pp
- Lucchi, E., Riqualificazione energetica dell'involucro edilizio, Dario Flaccovio, Palermo, 2014.
- D'Orazio, D. I. M. (2008). Il comportamento delle coperture ventilate in fase invernale. L'industria dei laterizi–maggio giugno, 111.
- Paolino, L., Il sistema tetto - Progettazione, comportamento e realizzazione delle coperture degli edifici. Maggioli Editore, 2013.
- Tucci, F. Involucro ben temperato. Efficienza energetica ed ecologica in architettura attraverso la pelle degli edifici. Alinea Editrice, Firenze, 2006
- Rossetti, M. Conti C, Sviluppo e Innovazione tecnologica degli isolanti termici per l'industria delle costruzioni, in C.Clemente, Pluralità Tecnologica. Papers, RDesignpress, Roma, 2012.
- Torricelli, M. C. (2000). Caldo d'inverno e fresco d'estate. Costruire in Laterizio, 77, pp. 56-67.
- http://www.miniwatt.it/mwprojects/Domat-Ems_Altersheim.pdf
- http://www.fivra.it/f/documenti/Rapporto_CRESME_set14.pdf

**Caratterizzazione dell'elemento isolante del sistema oggetto di studio:
pannello sandwich a base di un biocomposito organico**

- Avella M., et al. *Poly (lactic acid)-based biocomposites reinforced with kenaf fibers*. Journal of Applied Polymer Science, 2008, 108.6: 3542-3551.
- Avella M., et al. *Eco-challenges of bio-based polymer composites*. Materials, 2009, 2.3: 911-925.
- Bekhta, P., Korkut, S., & Hiziroglu, S. Effect of Pretreatment of Raw Material on Properties of Particleboard Panels Made from Wheat Straw. BioResources, 2013, 8(3), 4766-4774.
- Boquillon N., Elbez G., Schönfeld U, Properties of wheat straw particleboards bonded with different types of resin. Journal of Wood Science 2004, 50. 3, 230–235
- Bogoeva-Gaceva, G., et al. Natural fiber eco-composites. *Polymer composites*, 2007, 28.1: 98-107.
- Cruciani L., Sintesi, modifica e caratterizzazione di polimeri da fonti rinnovabili. 2013. PhD Thesis. Alma Mater Studiorum Università di Bologna
- Cimino F., Preparazione di compositi rinforzati con fibre Naturali destinati ad applicazioni nell'edilizia ecosostenibile. 2009. PhD Thesis. Università degli Studi di Napoli Federico II.
- Carrino, L., & Durante, M. (2011). Realizzazione e caratterizzazione di laminati in composito polimerico termoplastico rinforzato con fibre naturali.
- Dukarska, D., Bartkowiak, M., & Stachowiak-Wencek, A., White mustard straw as an alternative raw material in the manufacture of particleboards resinated with different amount of urea formaldehyde resin. Drewno: prace naukowe, doniesienia, komunikaty, 58. BioResources, 2015, 6(1), 477-486.

- Henton D. E., et al. Polylactic acid technology. Natural fibers, biopolymers, and biocomposites, 2005, 527-577.
- Hiziroglu, S., Bauchongkol, P., Fueangvivat, V., Soontonbura, W., & Jarusombuti, S. Selected properties of medium density fiberboard (MDF) panels made from bamboo and rice straw. Forest products journal, 2007, 57.6, pag. 46.
- Jarusombuti, S., Hiziroglu, S., Bauchongkol, P., & Fueangvivat, V. Properties of sandwich-type panels made from bamboo and rice straw. Forest products journal, 2009, 59.10, pag 52-57.
- Minguzzi G., *Fiber Reinforced Plastics. Utilizzo dei materiali compositi a matrice polimerica in edilizia civile*, Firenze, Alinea Editrice, 1998.
- Panthapulakkal, S., Zereskian, A., & Sain, M. Preparation and characterization of wheat straw fibers for reinforcing application in injection molded thermoplastic composites. Bioresource technology, 2006, 97.2, 265-272.
- Vignoli, A., & Borghini, A. Risultati ed interpretazione di prove sperimentali effettuate su pannelli “sandwich” impiegati per strutture prefabbricate monopiano.
- Progetto ECO-PCCM (Eco-houses based on eco-friendly polymer composite construction materials) Maurizio Avella CNR http://cordis.europa.eu/result/rcn/49566_en.html
- Vink ETH, Rábago KR, Glassner DAGruber PR. Applications of life cycle assessment to NatureWorks™ polylactide (PLA) production. Polymer Degradation Stability 80, 403-419 (2005)
- <http://www.novofibre.com/en/products/products-overview.php>

